Elektrischer Antriebsstrang

6

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Benjamin Dorn, Sebastian Hagedorn, Konstantin Sasse, Till Augustin Backes, Moritz Frieges, Jens Polzenberg, José Guillermo Dorantes Gómez, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther, Ruben Förstmann und Carsten Nee

Das entscheidende Differenzierungsmerkmal eines Elektrofahrzeugs gegenüber einem konventionellen Fahrzeug ist der Antriebsstrang. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der elektromobilspezifischen Veränderung des Antriebsstrangs sowie den einzelnen Komponenten. Im Fokus stehen dabei der Hochvoltspeicher, die elektrische Maschine sowie die für den Betrieb notwendige Elektronik. Darüber hinaus werden Anordnungs-

H. H. Heimes
Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker
Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns · B. Dorn
Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de; b.dorn@pem.rwth-aachen.de

S. Hagedorn · K. Sasse · M. Frieges
Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de; k.sasse@pem.rwth-aachen.de; m.frieges@pem.rwth-aachen.de;

T. A. Backes (✉) J. Polzenberg · J. G. D. Gómez
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: t.backes@pem.rwth-aachen.de; j.polzenberg@pem.rwth-aachen.de; j.dorantes@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_6

strategien der Elektromobilkomponenten im Fahrzeug diskutiert, da sich durch die kompakte Bauweise der Komponenten neue Freiheitsgrade ergeben.

6.1 Veränderungen im Antriebsstrang

Das äußere Erscheinungsbild konventioneller und elektrischer Fahrzeuge erscheint auf den ersten Blick sehr ähnlich. Die Veränderungen des Antriebsstrangs bei einem Wechsel der Antriebsart sind jedoch erheblich. Im Folgenden werden diese Veränderungen im Antriebsstrang beschrieben. Dabei wird bei einem konventionellen Antriebsstrang stets von einem solchen mit Verbrennungsmotor ausgegangen.

Durch die gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen verschiedenen Prinzipien der Energiespeicherung und Energiewandlung ist der elektrische Antriebsstrang grundlegend anders aufgebaut als ein verbrennungsmotorischer Antriebsstrang. In Abb. 6.1 sind die Änderungen im Hinblick auf die Komponenten der beiden Varianten dargestellt. Mit dem Verbrennungsmotor und dem mehrstufigen Getriebe entfallen für den elektrischen Antriebsstrang zwei zentrale und hochkomplexe Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs. Durch die mechanisch weniger komplexe Bauweise elektrischer Antriebsstränge reduziert sich die Zahl der Antriebsstrangkomponenten von rund 1400 beim konventionellen Antriebsstrang auf rund 210 Komponenten.[1]

Neben den entfallenden Komponenten kommen im elektrischen Antriebsstrang im Vergleich mit dem konventionellen auch neue Komponenten hinzu. Am offensichtlichsten sind hier die Kernkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs: Elektromotor, Leistungselektronik und Energiespeichersystem.[2] Das Energiespeichersystem kann einzig ein Akkumulator, aber auch die Kombination verschiedener Systeme sein, zum Beispiel Lithium-Ionen-Batterie und Brennstoffzellensystem.

[1] Vgl. Thielmann et al. 2020, S. 19f.

[2] Vgl. Pischinger und Seiffert 2021, S. 661.

C. Deutskens
CEO & Partner, PEM Motion GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.deutskens@pem-motion.com

K. Kreisköther
Co-Founder & CEO, Ducktrain, Aachen, Deutschland
E-Mail: Kai.kreiskoether@ducktrain.io
R. Förstmann
Projektleiter, TQ-Systems GmbH, Wetter (Ruhr), Deutschland
E-Mail: ruben.foerstmann@tq-group.com

C. Nee
Associate Partner, McKinsey & Company Inc., Hamburg, Deutschland
E-Mail: Carsten_Nee@mckinsey.com

Obsolete Komponenten	Veränderte/Optionale Komponenten	Hinzukommende Komponenten
• Verbrennungsmotor (Motorblock, Kolben, Nockenwelle) • Kupplung • Einspritzsystem • Kraftstofftank • Abgasanlage • Nebenaggregate (Lichtmaschine, Turbolader)	• Getriebe • Klimaanlage/Heizung • Pumpsysteme (Kühlung, Hydraulik) • Wärmedämmung • Kraftübertragung (Antriebswellen, Differenzial)	• Elektromotor • Leistungselektronik • Energiespeichersystem (Batterie, Wasserstoff/ Brennstoffzelle, Kondensator) • Energiemanagement • Thermomanagement • Ladegerät • „By-Wire“-Funktionen

Abb. 6.1 Veränderungen im Antriebsstrang

Über die neuen und die entfallenden Komponenten hinaus gibt es auch solche, die im elektrischen Antriebsstrang optional eingesetzt werden oder im Vergleich zum konventionellen Antrieb in ihrer Funktionsweise verändert werden müssen. Beispielsweise ist bei elektrischen Antriebssträngen aufgrund des hohen Gesamtwirkungsgrades die Abwärme der Komponenten zu gering, um sie für die Heizung des Fahrzeuginnenraums zu nutzen. Aus diesem Grund müssen Heizung und Klimaanlage im elektrischen Fahrzeug neu konzipiert werden. Nicht nur im Fahrzeuginnenraum muss die Temperatur stimmen: Im Winter muss die Batterie beheizt werden, um optimal zu arbeiten und auf längere Sicht keinen Schaden zu nehmen. Dafür und zur entsprechenden Kühlung, zum Beispiel im Sommer, wird in elektrischen Antriebssträngen ein spezielles Thermomanagement verbaut.

Eine weitere Modifikation im Antriebsstrang sind die geänderten Bauteilvolumen und die Bauteilanordnung.[3] Demnach gibt es unterschiedliche Topologien, die die spezifische Anordnung von Elektromotor und zugehöriger Peripherie beschreiben. Der Elektromotor nimmt nur einen Teil des Volumens eines Verbrennungsmotors ein, was viele Möglichkeiten der Anordnung im Antriebsstrang zulässt. Darüber hinaus entfällt beim Elektromotor das Getriebe, das ebenfalls ein erhebliches Volumen im konventionellen Antriebsstrang einnimmt. Im elektrischen Antriebsstrang benötigt hingegen die Batterie viel Platz und muss dementsprechend so konzipiert werden, dass sie in das Fahrzeug integriert werden kann. Die anforderungsgerechte Anordnung der Baugruppen im Fahrzeug gehört zur mechanischen Integration und wird auch „Packaging“ genannt. Sie stellt vor allem beim Nachrüsten elektrische Antriebsstränge in konventionelle Fahrzeuge eine besondere Herausforderung dar.

Auch die elektrische Integration birgt gewisse Herausforderungen. Hierbei müssen die Spannungslevel aller Komponenten aufeinander abgestimmt werden und die elektrischen

[3] Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 336ff.

Verbindungen müssen der maximalen elektrischen Last standhalten. Daraus entstehen zum einen besondere Anforderungen an die Sicherheit des elektrischen Antriebsstrangs, zum anderen müssen Aspekte wie die elektromagnetische Verträglichkeit und die elektrische Geräuschentwicklung der Bauteile (beispielsweise Spulenfiepen) berücksichtigt werden.[4]

Wachsende Anforderungen an bestehende Antriebslösungen sind wesentliche Treiber für deren Weiterentwicklung. Die fortwährende Erschließung neuer Technologien deckt Chancen für elektrische Antriebe auf, Defizite gegenüber konventionellen Antrieben zu kompensieren oder gar zu beseitigen und dabei die Produkt- und Produktionskosten zu senken. Neben neuen Technologien sorgen auch die aufgrund erhöhter Nachfrage steigenden Stückzahlen für eine Kostensenkung der Komponenten für den elektrifizierten Antriebsstrang.[5] Gleichzeitig treiben die zur Einhaltung von Emissionsgrenzen notwendigen Maßnahmen an Verbrennungskraftmaschinen deren Kosten nach oben.

So ergeben sich vielfältige Chancen für Unternehmen, die sich Kompetenzen für die jeweiligen Komponenten in anderen Geschäftsfeldern aufgebaut haben, ebenfalls in den Markt der Elektromobilität einzusteigen. Aufgrund der noch nicht weit fortgeschrittenen Technologiereife besteht keine ausgeprägte Marktmacht etablierter, hocheffizient produzierender Unternehmen. Vielmehr bestehen für kleine und mittelständische Unternehmen ähnliche Ausgangsvoraussetzungen.

6.2 Antriebsstrangkonzepte in Elektrofahrzeugen

Der elektrische Antriebsstrang ist das Bindeglied zwischen der Traktionsbatterie und der Antriebswelle. Er beinhaltet die Komponenten, die für eine Umwandlung der gespeicherten elektrochemischen Energie in der Batterie in mechanische Antriebsenergie notwendig sind. Der Pfad der Energiewandlung ist vereinfacht in Abb. 6.2 dargestellt. Die von der Batterie bereitgestellte elektrische Energie wird in Form einer Gleichspannung an den elektrischen Zwischenkreis abgegeben. An diesen Zwischenkreis sind alle Verbraucher im Fahrzeug angeschlossen. Um die elektrische Energie für den Antrieb nutzen zu können, wandelt ein Wechselrichter die Gleichspannung der Batterie in eine Wechselspannung um, wie sie beispielsweise von Drehfeldmaschinen benötigt wird.[6] Die elektrische Maschine wandelt wiederum die elektrische Energie in mechanische Energie um. Es wird ein Drehmoment bei



Abb. 6.2 Schematischer Energiepfad im elektrischen Antriebsstrang

[4] Vgl. Marenbach et al. 2020, S. 217.
[5] Vgl. Ajanovic und Glatt 2020, S. 143.
[6] Vgl. Pischinger und Seiffert 2021, S. 674.

einer bestimmten Drehzahl an die Räder abgegeben und das Fahrzeug wird angetrieben. Dieses Prinzip der Energiewandlung lässt sich auch umkehren. Bei der elektrischen Bremsung (Rekuperation) wird die Verzögerungsenergie in elektrische Energie durch die Maschine als Generator umgewandelt und über den Wechselrichter in der Batterie gespeichert.

Es existiert eine Vielzahl von realisierbaren Möglichkeiten, die Komponenten „Umrichter“, „Elektromotor“ und „Getriebe“ anzuordnen. Vier grundlegende Möglichkeiten der Komponentenanordnung sind in Abb. 6.3 dargestellt. Welches Konzept verwendet wird und ob ein Getriebe oder eine Kupplung notwendig ist, wird mit einer Analyse des Anforderungsprofils für das zu entwickelnde Fahrzeug ermittelt. Dabei stellt ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad über einen für den Betrieb des Fahrzeugs charakteristischen Fahrzyklus eine der wesentlichen Variablen dar, nach denen das System optimiert wird. Ein hoher Gesamtwirkungsgrad bedeutet eine größere Reichweite des Fahrzeugs bei gleichem Energiespeicher. Weitere Entscheidungskriterien zur Konzeptauswahl können sich aus Randbedingungen des vorhandenen Platzes und dem Packaging der Antriebselemente „Batterie“, „Leistungselektronik“ und „Motor“ ergeben. Die Notwendigkeit eines Getriebes ergibt sich aus dem Anforderungsprofil für das Fahrzeug und den spezi-

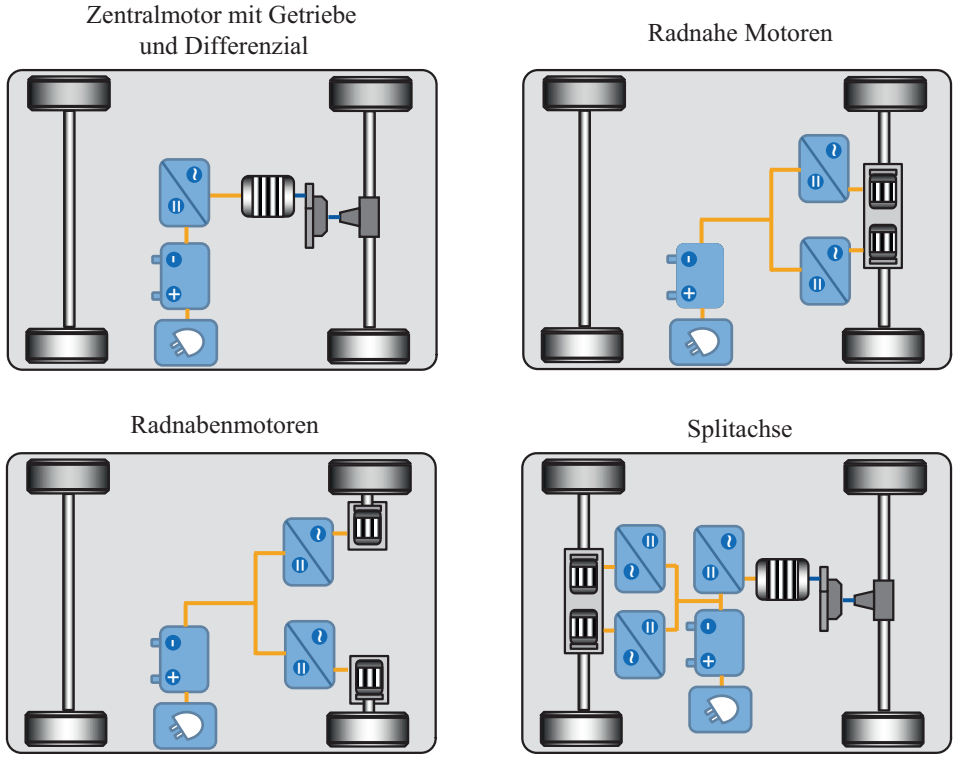


Abb. 6.3 Möglichkeiten für Antriebsstrangkonzepte in Elektrofahrzeugen. (Eigene Abbildung in Anlehnung an Tschöke et al. 2020, S. 193ff.)

fischen Leistungsdaten des verwendeten Motors. In jedem Fall kann ein Getriebe verwendet werden, um den Motor vor den dynamischen Lasten während der Fahrt zu isolieren und ihn so zu schonen. Unter anderem besteht die Möglichkeit, den Antrieb eines Fahrzeuges radnah zu realisieren.[7] Radnah bedeutet in diesem Fall, dass der Antrieb mit dem Rad über eine Welle verbunden ist und das Differenzial in der mechanischen Leistungsübertragung wegfällt. Radnahe Antriebe treiben somit die Räder immer individuell an und die Funktion des Differenzials muss die elektronische Steuerung übernehmen. Eine weitere Möglichkeit der Anordnung sind Radnabenantriebe.[8] In diesem Fall ist der Elektromotor im angetriebenen Rad selbst untergebracht. Radnabenantriebe sind aufwendig in der Konstruktion und der Konzeptionierung, da häufig auch ein Planetengetriebe im Rad integriert werden muss und der Bauraum dort beschränkt ist. Zusätzlich muss bei Radnabenkonzepten auf die Dynamik des gesamten Fahrzeugs geachtet werden. Wegen der ungefederten Massen wird der Antrieb im Rad erhöhten mechanischen Belastungen ausgesetzt. Ein Vorteil von Radnabenantrieben ist der gewonnene Bauraum im Fahrzeug, da die Maschine und das Getriebe dort keinen Platz in Anspruch nehmen.

Über die Vielzahl mechanischer Antriebskonzepte hinaus ergeben sich auch im elektrischen Teil des Antriebsstrangs unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung der Energieversorgung. Am häufigsten wird die Energieversorgung des elektrischen Antriebsstrangs über eine Batterie realisiert.[9] Zunehmend wird die Batterie jedoch durch weitere Energiespeichersysteme ergänzt, das heißt, sie stellt noch immer einen wesentlichen Teil des Gesamt-Energiespeichersystems eines Fahrzeugs dar, wird aber von weiteren Systemen unterstützt. Einen Teil der elektrischen Last über ein Brennstoffzellensystem abzudecken, ist eine dieser Möglichkeiten. Die Brennstoffzelle lässt sich dabei im Wesentlichen auf zwei Arten betreiben. Zum einen kann sie eine elektrische Grundlast während der gesamten Fahrt abdecken. Da Brennstoffzellen im Allgemeinen nicht dynamisch betrieben werden sollten, ist die Batterie für Leistungsspitzen zuständig, die während der Fahrt auftreten. Zum anderen kann die Brennstoffzelle als „Range Extender“ dienen. Sobald der Ladezustand der Batterie unter einen gewissen Schwellenwert sinkt, beginnt die Brennstoffzelle damit, die Batterie wieder aufzuladen. Andere Konzepte, die aber nur zur kurzzeitigen Energiespeicherung geeignet sind, beinalten Schwungräder oder Superkondensatoren.

Die zahlreichen möglichen Topologien mit individuellen Vorzügen und Nachteilen je nach Anwendungsfall rufen eine Variantenvielfalt im automobilen Sektor hervor, die für konventionelle Antriebsstränge nicht möglich war. Die Komplexität der Implementierung elektrischer Antriebsstränge – vor allem in bestehende Fahrzeugstrukturen – stellt eine Herausforderung dar.[10] Letztlich wird neben den sicherheitstechnischen und zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten die Käuferakzeptanz, insbesondere, welcher Funktionsumfang

[7] Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 210.

[8] Vgl. Trzesniowski 2019, S. 189.

[9] Vgl. Adib et al. 2019, S. 2.

[10] Vgl. Adib et al. 2019, S. 2.

zu welchem Preis erhältlich ist, die Topologien der aktuellen Generation von Elektrofahrzeugen prägen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass zunächst auf simple, zuverlässige und günstige Konzepte gesetzt wird, um auf einem von konventionellen Antriebskonzepten dominierten Markt konkurrenzfähig zu sein.

6.3 Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs

Der elementare Aufbau eines elektrischen Antriebsstrangs umfasst einen Energiespeicher, einen Elektromotor mit mechanischem Getriebe sowie die erforderlichen Energiewandler und Wechselrichter, die die Komponenten mit dem erforderlichen Maß an elektrischer Energie versorgen. Mit einem Wirkungsgrad des Antriebsstrangs von 80 % übertreffen Elektrofahrzeuge die 17 bis 20 % ihrer traditionellen ICE-Pendants bei Weitem.[11] Dieser Wirkungsgrad entspricht jedoch der lokalen Nutzung der Energie im Fahrzeug; der „Well-to-Wheel"-Wirkungsgrad und die Emissionen für Elektrofahrzeuge sind weitgehend vom Energiemix abhängig, der zur Erzeugung der elektrischen Energie verwendet wird, und sie sind dort besser, wo erneuerbare Energiequellen einen größeren Anteil der Netzenergie erzeugen.[12] Abb. 6.4 zeigt ein repräsentatives Layout eines elektrischen Antriebsstrangs für ein batterieelektrisches Fahrzeug.

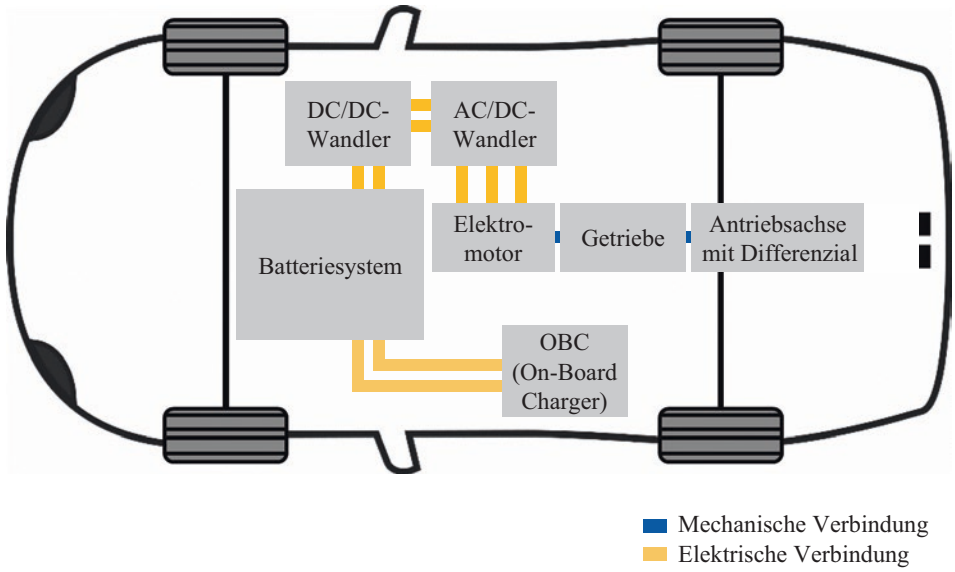


Abb. 6.4 Schematische Darstellung eines elektrischen Antriebsstrangs

[11] Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 34.

[12] Vgl. L. Athanasopoulou, H. Bikas, P. Stavropoulos 2018.

Batterie/Energiequelle
Genau wie bei ICE-Fahrzeugen muss die Energie für das Fahrzeug in einem Energiespeicher vorgehalten werden, von wo aus sie zu den Komponenten, Systemen und Subsystemen transportiert wird, die sie benötigen. Lithium-Ionen-Batterien sind heute die am häufigsten verwendete Methode zur Speicherung und Bereitstellung von Energie für Elektrofahrzeuge und sie können auch wieder aufgeladen werden, wenn ihre Energie verbraucht ist. Batterien sind nicht das einzige Mittel, um Energie in einem Elektrofahrzeug zu speichern; dies kann auch durch den Einsatz von Brennstoffzellensystemen geschehen. Dabei wird Kraftstoff – beispielsweise in Form von Wasserstoff – in einem Tank gespeichert und über ein Pumpelement der Brennstoffzelle zugeführt, die die chemisch gespeicherte Energie des Kraftstoffs in elektrische Energie umwandelt, die wiederum später in der Batterie gespeichert oder direkt zu Verbrauchern (Komponenten) geleitet wird. Brennstoffzellen- und Batteriesysteme werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Elektrische Maschine
Die elektrische Maschine ersetzt den Verbrennungsmotor im Antriebsstrang und ist ein Element, das die elektrische Energie aus der Batterie in mechanische Energie umwandelt. Diese Energie wird dem Motor durch einen Wechselrichter zugeführt, der die erforderliche Ausgangsleistung des Motors durch Änderung des Eingangsstroms und der Eingangsspannung regelt. Die Energieumwandlung im Motor erfolgt durch die Wechselwirkung der Magnetfelder der beiden Hauptkomponenten des Motors: Stator und Rotor. Im Allgemeinen liefert der Stator ein rotierendes Magnetfeld, dem das Magnetfeld des Rotors folgt, wodurch dieses Element in Rotation versetzt wird und eine mechanische Kraft erzeugt, die zum Antrieb des Fahrzeugs verwendet wird. Darüber hinaus können elektrische Maschinen vorwärts und rückwärts rotieren und dabei entweder eine Zugkraft (Motorbetrieb) oder Energie (Generatorbetrieb) erzeugen. Diese Eigenschaft wird genutzt, um das Fahrzeug im Motorbetrieb vorwärts und rückwärts anzutreiben und im Generatorbetrieb Energie zu erzeugen, die beim Bremsen in der Batterie gespeichert wird. Es ist möglich, einen einzelnen Motor für das gesamte Fahrzeug zu verwenden oder einzelne Motoren für zwei oder mehr Räder.

Getriebe (Differenzial)
Elektrische Maschinen können ein breites Spektrum von Drehmoment-Drehzahl-Kombinationen erzeugen, was es ihnen vor allem ermöglicht, bei sehr niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment zu generieren. Allerdings sind sie in ihrem gesamten Spektrum gleich effizient und bei höheren Drehzahlen nimmt das verfügbare Drehmoment ab. Ein (ein- oder mehrstufiges) Untersetzungsgetriebe wird daher zwischen dem Elektromotor und dem Rad eingesetzt, um das Ausgangsdrehmoment und die Drehzahl des Motors so zu transformieren, wie es der Anwendungsfall des Antriebs erfordert – und zwar mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad des Motors. Darüber hinaus wird bei Verwendung einer einzelnen Motoreinheit ein Differenzialgetriebe eingesetzt, um die Traktionsenergie zu verteilen und die Fahrzeuglenkung zu ermöglichen. Je nach Topologie des Antriebs-

strangs gibt es zahlreiche verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von Getrieben – die Funktion bleibt indes die gleiche.

Ladegerät an Bord
Ein „On-Board Charger“ (OBC) bietet die Möglichkeit, die Batterie von einer externen Energiequelle – in der Regel dem Stromnetz – aufzuladen. Im Allgemeinen werden für den Ladevorgang zwei Subsysteme benötigt: eines, das die externe Energie in ein mit der Batterie kompatibles Niveau umwandelt – etwa AC/DC-Wechselrichter –, und ein Subsystem, das dafür sorgt, dass die einzelnen Zellen vor Überladung geschützt werden. Das ist notwendig, weil verschiedene Zellen im Akku-Pack unterschiedliche Ladezustände aufweisen. Diese letzte Funktion wird durch das Batterie-Management-System übernommen.[13] Weitere Details zum Ladevorgang sind in den späteren Abschnitten dieses Buches zu finden.

DC/DC-Wandler
Beim Betrieb des elektrischen Antriebsstrangs ist es notwendig, Spannung aus verschiedenen Systemen, Subsystemen und Komponenten zu entnehmen und in andere einzuspeisen, die unterschiedliche Leistungs- und Spannungsanforderungen haben können. Ein Gleichspannungswandler ist eine leistungselektronische Schaltung, die eine Gleichspannung in ein anderes Gleichspannungsniveau umwandelt. In einem elektrischen Antriebsstrang werden verschiedene solcher Wandler benötigt. Abb. 6.4 zeigt eine Anwendung, bei der ein Gleichspannungswandler vor dem Wechselrichter platziert wird, um die Eingangsspannung zu regeln, die dem Wechselrichter zugeführt wird, und die Spannung, die der Wechselrichter im Falle einer Rekuperation in die Batterie speist. In beiden Fällen wird der Gleichspannungswandler verwendet, um die Spannung und die Frequenz auf den vom jeweiligen System benötigten Wert einzustellen. Eine weitere Anwendung findet sich in brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen, wo der Gleichspannungswandler die Brennstoffzellenspannung zur Versorgung von Komponenten verstärkt.

Wechselrichter
Die Batterie des Elektrofahrzeugs liefert eine Gleichspannung, die in eine Wechselspannung umgewandelt werden muss, welche die elektrische(n) Maschine(n) versorgt. Dies ist Aufgabe des Wechselrichters, ebenso wie die Versorgung mit variabler Spannung, Strom und Frequenz sowohl von der Batterie zur elektrischen Maschine im Motorbetrieb als auch von der elektrischen Maschine zur Batterie im Generatorbetrieb.

Dies sind die Basiselemente eines elektrischen Antriebsstrangs. Weitere, hier nicht dargestellte Komponenten sind erforderlich – etwa die Elemente des Thermomanagementsystems, Verbindungen zum Fahrwerk oder Komponenten wie das Lenksystem, die andere für den Fahrzeugbetrieb notwendige Funktionen übernehmen. In den folgenden Ab-

[13] Vgl. Karle 2015, S. 93f.

schnitten werden die Eigenschaften der Basiskomponenten und die verschiedenen realisierbaren Antriebsstrang-Topologien näher erläutert.

6.3.1 Elektromotoren für den Traktionsantrieb

Gegenüber dem Verbrennungsmotor ergeben sich für den Elektromotor Vorteile durch eine kompaktere Bauweise und eine geringere Anzahl von Bauteilen.[14] Dies ist vor allem auf das Motorprinzip zurückzuführen, das für die gängigen Maschinentypen auf einem feststehenden Stator und einem innerhalb oder außerhalb drehenden Rotor basiert. Innerhalb des Motors befinden sich keine oszillierenden Bauteile und vergleichsweise wesentlich weniger rotierende Bauteile, was zum Beispiel Auswirkungen auf die Anzahl verbauter Gleit- und Kugellager hat. Dies hat auch zur Folge, dass Elektromotoren nie oder nur selten gewartet werden müssen. Darüber hinaus weist ein Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 87 bis 97 % eine wesentlich höhere Effizienz auf als ein Verbrennungsmotor (30 bis 45 %).[15] Ein weiterer Vorteil des Elektromotors im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der Wegfall von Kupplung und gegebenenfalls auch Getriebe im Antriebsstrang. Da Elektromotoren charakteristischerweise ab einer Drehzahl von null ihr maximales Moment liefern können, ist keine Kupplung notwendig, um die Drehzahl von Rad und Motor zu synchronisieren (vgl. Abb. 6.5). Hinzu kommt, dass Elektromotoren ihr Drehmoment über ein breites Drehzahlband abgeben können und somit auf ein schaltbares Getriebe verzichtet werden kann. Unter dem Gesichtspunkt optimaler Effizienz ist der Einsatz eines schaltbaren Getriebes allerdings durchaus zu bewerten.

Elektromotoren lassen sich anhand ihrer Funktionsprinzipien in verschiedene Typen einteilen.[16] In der automobilen Anwendung werden hauptsächlich Radialflussmaschinen eingesetzt, die sich wiederum in weitere Typen einteilen lassen. Die individuellen Vorzüge und Nachteile der Typen sorgen dafür, dass sie sich je nach Anwendung verschieden gut eignen. Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) weisen den höchsten Wirkungsgrad und die höchste Leistungsdichte der gängigen Radialflussmaschinen auf. Allerdings werden für diesen Maschinentyp Permanentmagnete benötigt, die mit hohen Kosten verbunden sind. PMSM finden hauptsächlich in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse sowie in Performance-Modellen Anwendung. Aufgrund ihrer Kompaktheit eignen sie sich auch für den Einsatz in Hybridfahrzeugen.

Fremderregte Synchronmaschinen (FSM) werden häufig in Fahrzeugen aus kostenempfindlichen Marktsegmenten eingesetzt, etwa in Kleinfahrzeugen. Durch den Entfall von Permanentmagneten und die einfache Konstruktion entstehen geringe Kosten für das Produkt. Aufgrund des höheren mechanischen Verschleißes elektrischer Kontaktstellen sind sie jedoch fehleranfällig und wartungsaufwendiger als andere Maschinentypen.

[14] Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 196.

[15] Vgl. Marenbach et al. 2020, S. 132ff.

[16] Vgl. Stan 2021, S. 284ff.

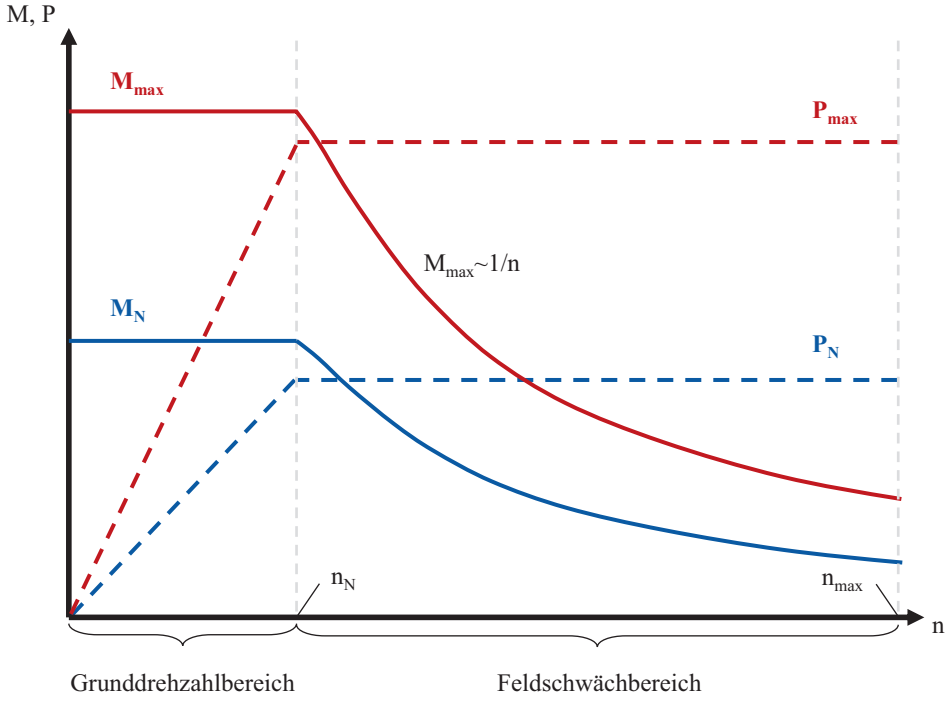


Abb. 6.5 Idealisiertes Betriebsdiagramm eines Elektromotors

Asynchronmaschinen (ASM) benötigen ebenfalls keine Magnete und sind daher kostengünstiger als PMSM. Darüber hinaus verfügen sie über eine besondere Drehmomentcharakteristik und spezielle Eigenschaften im Segelbetrieb, was sie für einige Anwendungen attraktiv macht. Insgesamt verfügen ASM allerdings über eine geringere Leistungsdichte und einen niedrigeren Wirkungsgrad als PMSM. Sie eignen sich besonders für Langstreckenfahrzeuge und Sonderfahrzeuge, zum Beispiel Bagger.

Im Antriebsstrang ist auch die Kombination verschiedener Motortypen möglich, um ihre jeweiligen Vorteile ausnutzen zu können. In der Praxis werden beispielsweise PMSM- und ASM-Motoren miteinander kombiniert, um für den Stadt- und Autobahnverkehr die jeweils optimale Antriebslösung zu erhalten.

Zum einen wird die Leistung von Elektromotoren durch die maximale Drehzahl begrenzt, bis zu der der Rotor ausgelegt ist. Zum anderen stellt die thermische Belastung des Elektromotors eine Leistungsbegrenzung dar.[17] Schließlich darf der Motor nur eine gewisse Temperatur erreichen, da sonst die Isolation der Drahtwicklung beschädigt wird oder die Magnete in einer PMSM entmagnetisiert werden. Aus diesem Grund tendieren die Entwicklungen im Bereich des Elektromotors derzeit zu leistungssteigernden Kühlkonzepten und zur Design-Optimierung mit Blick auf die Minimierung der Verluste im Motor.

[17] Vgl. Stan 2021, S. 80.

6.3.2 Hochvolt-Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge

Traktionsbatterien versorgen das Elektrofahrzeug im Betrieb mit der notwendigen elektrischen Energie, die sowohl die E-Motoren zur Gewährleitung des Vortriebs als auch sämtliche Hochvolt-Nebenverbraucher benötigen. Während die Traktionsbatterie im Fahrzustand Energie abgibt, kann sie durch Rekuperation (kurzfristig) und Laden an externen Energiequellen wieder mit Energie versorgt werden.

Traktionsbatterien liegen in einem Hochspannungsbereich, also nach ISO 6469-3 im Spannungsbereich B über 60 V.[18] Lediglich bei Fahrzeugen der Klasse „Mild-Hybrid" liegt die Spannung üblicherweise unterhalb der 60 V. Derzeit haben sich im Allgemeinen zwei typische Spannungslagen etabliert. Am weitesten verbreitet sind 400-Volt-Systeme, bei denen die maximale Systemspannung im Bereich um 400 V liegt. Darüber hinaus gibt es vereinzelt Fahrzeuge, die auf ein 800-Volt-System setzen. Durch die Verdoppelung der Systemspannung ergibt sich insbesondere der Vorteil von erhöhten abrufbaren elektrischen Leistungen. Dies ist weniger für das Fahrerlebnis relevant, sondern primär für das Schnellladen von Interesse. Der Vorteil der erhöhten Leistungsfähigkeit wird jedoch durch eine komplexere Leistungselektronik erkauft. Während für 400-Volt-Systeme bereits zahlreiche Zulieferkomponenten verfügbar sind, ist die Auswahl an Komponenten für 800-Volt-Systeme derzeit noch eingeschränkt. Vor allem in Anbetracht der zunehmenden Elektrifizierung von (schweren) Nutzfahrzeugen ist eine Besserung in den nächsten Jahren zu erwarten, da aufgrund des im Vergleich zu Pkw hohen Leistungsbedarfs von Nutzfahrzeugen Traktionsbatterien mit einem höheren Energiegehalt zum Einsatz kommen. Um diese in kurzer Zeit aufladen zu können, wächst die Bedeutung des Schnelladens und damit die Relevanz der 800-Volt-Systemarchitektur.

Eine Traktionsbatterie ist ein in sich abgeschlossenes System, das geeignete Schnittstellen zum Fahrzeug bieten muss. Diese Schnittstellen sind mechanischer, thermischer und elektrischer Natur. Mechanisch muss das Batteriesystem in das Fahrzeug integriert werden. Dabei übernimmt das Batteriesystem zunehmend auch strukturelle Aufgaben und unterstützt die Karosserie. Thermisch muss die Batterie an das Thermomanagement im Fahrzeug angeschlossen werden. Das externe Thermomanagement stellt ein temperiertes Medium bereit, mit dem im Regelfall eine Kühlung der Batterie angestrebt wird; bei Bedarf kann durch dieses Medium jedoch auch ein Heizen der Batterie erfolgen. Bei den elektrischen Schnittstellen lassen sich zwei Varianten unterscheiden. Erstens existiert eine Hochspannungsschnittstelle zum Fahrzeug, die üblicherweise in Form von Steckern ausgeführt wird. Über diesen Anschluss erfolgt die Leistungsversorgung des Fahrzeugs. Zweitens bestehen Niederspannungsanbindungen an das Fahrzeug: Über diese Schnittstelle wird einerseits die interne Batteriesteuerung mit Energie versorgt und andererseits mittels diverser Kommunikationsprotokolle ein Informationsaustausch ermöglicht.

Das Herzstück der Traktionsbatterie sind die Batteriezellen. In ihnen wird die Energie elektrochemisch gespeichert und bei Bedarf abgegeben. In der Fahrzeugtechnik hat sich

[18] Vgl. ISO 2021.

die Verwendung von Lithium-Ionen-Batteriezellen als Energiespeicher etabliert. Die Batteriezellen werden in Elektrofahrzeugen derzeit zunächst in einzelne Module geschaltet. Die Verschaltung der einzelnen Zellen kann seriell oder parallel beziehungsweise in einer Kombination aus beidem erfolgen. Die serielle Verschaltung erwirkt eine gesteigerte Spannung, die parallele Verschaltung eine gesteigerte Kapazität der Module. Die Spannung auf Modulebene bleibt typischerweise unter 60 V, um eine erhöhte Komplexität der Produktion aufgrund von Vorgaben zur Arbeit unter Hochspannung zu vermeiden. Die Batteriemodule müssen eine Schnittstelle zum Thermomanagementsystem gewährleisten, um die Batteriezellen im gewünschten Temperaturfenster zu halten. Sensorik überwacht die Module beziehungsweise einzelne Zellen. Die Batteriemodule werden in einem Batteriepack zu einem Gesamtsystem verbunden. Dort werden die Ergebnisse der Sensorik im Batteriemanagementsystem (BMS) aggregiert. Zusätzlich werden elektrische Bauteile wie beispielsweise Schütze und Sicherungen auf Systemebene integriert. Die Schütze schalten das Batteriesystem nach außen spannungsfrei. Gesteuert werden sie durch das Batteriemanagementsystem. Die Sicherungen unterbrechen zu hohe Ströme, die beispielsweise im Kurzschlussfall auftreten können. Das Hochspannungsniveau (400 V oder 800 V) wird in der Regel erst auf der Ebene des Gesamtsystems erreicht.

In Bezug auf die Topologie von Batteriesystemen sind verschiedene Entwicklungen erkennbar, um die Energiedichte auf Systemebene weiter zu erhöhen. Auf Zellebene ist in allen drei Formaten ein Trend zu Batteriezellen mit höheren Kapazitäten erkennbar. Durch größere Zellen wird die volumetrische Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums auf Batteriezellebene verbessert. In der Folge sind weniger Zellen für die Batteriemodule und das Batteriesystem notwendig, die Anzahl zusätzlicher peripherer Komponenten wird reduziert und die Energiedichte auf Systemebene verbessert sich.[19]

Neben der geometrischen Vergrößerung der Batteriezellen gibt es Bestrebungen, den einzelnen Zellen strukturelle Aufgaben des Batteriesystems zu übergeben. Die mechanische Stabilität des Gesamtsystems wird dann nicht mehr nur durch die Packstruktur oder die einzelnen Module gewährleistet, auch einzelne Batteriezellen tragen aktiv zur strukturellen Stabilität bei. Somit können Zwischenebenen aus der Produktstruktur klassischer Systeme entfallen. In diesem Zusammenhang wird von „Cell-to-X"-Systemen gesprochen. Im „Cell-to-Pack"-Ansatz wird die Modulebene übersprungen. Die einzelnen Batteriezellen werden direkt derart seriell und parallel verschaltet, dass die Kombination aller Zellen das Batteriepack ergeben. Durch den Entfall der Modulebene lässt sich eine signifikante Steigerung in der gravimetrischen Energiedichte auf Systemebene um bis zu 15 % erreichen.[20] Aufgrund der starren Gehäuse sind die Formate der zylindrischen sowie der prismatischen Zellen prädestiniert für solche funktionsintegrierten Systeme. Doch auch für Pouch-Zellen sind grundsätzlich Ansätze in Richtung eines „Cell-to-Pack"-Aufbaus denkbar. Hier ist jedoch verstärkt auf den konkreten Lastpfad der Kräfte in der Batterie zu achten.

[19] Vgl. Löbberding et al. 2020.

[20] Vgl. Gerlitz et al. 2021.

In einer weiteren Iteration sind „Cell-to-Vehicle"-Systeme denkbar. In diesem Fall tragen die einzelnen Batteriezellen nicht zu einem Gesamtbatteriesystem bei, sondern werden direkt in die Fahrzeugstruktur integriert. Es handelt sich also um einen Ansatz, der maximale Funktionsintegration erfordert und ermöglicht. Aufgrund ebendieser notwendigen Integrationstiefe sind „Cell-to-Vehicle"-Systeme derzeit noch nicht erhältlich.

Der Wegfall beispielsweise der Modulebene im Falle des „Cell-to-Pack"-Systems erfordert neue Ansätze im Gesamtsystemaufbau. Während Batteriemodule verhältnismäßig kleine Einheiten bilden, die sich in der Produktion gut manipulieren und verarbeiten lassen, müssen bei den neuen Konzepten die Zellen direkt im Gesamtsystem verschaltet und integriert werden. Die elektrische und thermische Kontaktierung erfolgt auf Systemebene. Dementsprechend müssen auch Kontaktierungseinheiten für Überwachungssysteme wie beispielsweise für Zellspannungen und Temperaturen angepasst werden.

6.3.3 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle als Kernkomponente des Brennstoffzellenantriebs wird durch die Möglichkeit charakterisiert, elektrische Energie über Wasserstoff als alternative Energiequelle bereitzustellen. Dabei gilt es, die Komponenten eines Brennstoffzellenantriebs als Erweiterung der gegebenen Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs – etwa Elektromotor und Traktionsbatterie – zu verstehen, die bedarfsgerecht anhand von Bauraum-, Gewichts- und Reichweitenanforderungen für die jeweilige Anwendung ausgelegt werden können. Da der Brennstoffzellenantrieb Vorteile eines rein batterieelektrischen Antriebs hinsichtlich einer mit dem Wasserstoffspeicher skalierbaren Reichweite sowie einer geringen Betankungszeit aufweist, bieten sich vor allem Potenziale in der Elektrifizierung von Nutzfahrzeuganwendungen. Mit Blick auf die Auslegung gibt es Ansätze, die einen brennstoffzellendominanten Antriebsstrang forcieren, und solche, die auf ein Brennstoffzellensystem mit geringerer Leistung abzielen – den „Range-Extender"-Ansatz.[21]

Im Bereich der mobilen Anwendung und somit der Elektromobilität ist eine Proton-Exchange-Membrane die bevorzugte Brennstoffzellentechnologie. Begründet liegt dies vor allem im vergleichsweise dynamischen Betriebsverhalten, in der begrenzten Betriebstemperatur und in der lokalen Emissionsfreiheit. Andere Brennstoffzellentechnologien wie etwa die alkalische oder die Hochtemperatur-Brennstoffzelle eignen sich daher gemäß dem aktuellen Stand der Technik nicht für die Anwendung im Transportsektor (siehe Abschn. 8.1).[22]

Ein Brennstoffzellensystem besteht aus einem Brennstoffzellen-Stack sowie den Peripherie-Komponenten, zu denen neben den Wasserstofftanks als Speicher auch die Komponenten des Luft- und Wasserstoffmoduls sowie der Steuerung und des Thermomanagements gehören. Ein Stack als Kern des Brennstoffzellensystems übernimmt die

[21] Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

[22] Vgl. Lipman und Weber 2019.

Funktion der Energieumwandlung von im Wasserstoff gebundener chemischer Energie in elektrische (siehe Abschn. 8.2).

Die Energieumwandlung geschieht in der einzelnen Brennstoffzelle, in welche über die Bipolarplatten Wasserstoff auf Anodenseite und Sauerstoff auf Kathodenseite geleitet wird. Beide Seiten sind über eine Polymermembran voneinander getrennt, die lediglich den inneren Ladungstransport der Wasserstoffprotonen ermöglicht. Auf der Kathodenseite oxidieren jeweils zwei Wasserstoffatome mit einem Sauerstoffatom und bilden Wasser als Produkt. Die freien Elektronen werden dabei über Stromabnehmer von der Kathoden- auf die Anodenseite geleitet, wodurch ein elektrischer Fluss entsteht. Durch das Stapeln und Verschalten zahlreicher Brennstoffzellen lässt sich die benötigte Traktionsleistung erzielen. Der Zusammenbau der einzelnen Brennstoffzellen mitsamt nachgelagertem Stacking – ebenjenem „Stapeln" – und die weitere Stack- und Systemmontage bilden die Prozessroute zur Herstellung eines Brennstoffzellensystems.[23]

Der Markthochlauf von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen läuft derzeit an. Erste Anbieter wie etwa Toyota und Hyundai vertreiben bereits Pkw, die die Technologie im Markt demonstriert. Hinsichtlich eines antizipierten Anlaufs werden allerdings Nutzfahrzeuge als priorisierte Anwendung betrachtet. Dabei bieten Hyundai und weitere, weniger große OEM bereits Kleinserien zum Verkauf an. In Szenarien für die Zeit ab 2030 wird der Absatz brennstoffzellenbetriebener Lkw auf über 50.000 Stück pro Jahr prognostiziert.[24] Der parallel notwendige Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur hat ebenso begonnen und bezieht sich gemäß aktuellem Stand auf mehr als 100 öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen in Europa.[25]

Der Markthochlauf von Brennstoffzellenfahrzeugen ist unweigerlich mit den zugrundeliegenden Kosten verbunden. Studien, die eine Kostenreduktion in US-Dollar pro Kilowatt von bis zu 15 % im Jahr 2025 vorhersagen, sind bisher nicht mit der Realität vereinbar.[26] Trotzdem existieren geeignete produktionstechnische Trends zur Prozessskalierung und Ressourceneffizienz, die erfolgversprechende Kostensenkungen ermöglichen.

6.3.4 Optimale Spannungslevel für Antriebssysteme

Ein zentrales Thema bei der Auslegung von Antriebssystemen ist die Wahl des für die Anwendung sinnvollsten Spannungsniveaus. Gegensätzliche Eigenschaften und Anforderungen bilden die größten Herausforderungen für die Entwicklung.

Der Energiespeicher stellt die elektrische Energie in Form von Gleichstrom (Direct Current – DC) bereit. Dabei wird das Spannungsniveau in zwei Arten unterteilt:[27]

[23] Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

[24] Vgl. Ruf et al. 2020, S. 105.

[25] Vgl. ACEA European Automobile Manufacturers Association 2020.

[26] Vgl. James et al. 2018.

[27] Vgl. Doppelbauer 2020, S. 269.

- Hochvolt: bis 1500 V DC
- Niedervolt: bis 120 V DC

Niedervoltsysteme
Beide Spannungslevel haben ihre Vor- und Nachteile. Im Niedervoltbereich bis 60 V DC ist ein Schutz gegen Berühren nicht zwingend notwendig, was sich positiv auf die Sicherheit sowie die Kosten der Entwicklung und Produktion auswirkt. Die niedrige Bordspannung verhindert einen elektrischen Schlag selbst bei schweren Crash-Situationen. Produktion und Wartung können ohne hochvoltgeschulte Mitarbeiter vorgenommen werden.[28]

Nachteilig wirken sich im Vergleich zu Hochvoltsystemen vor allem die bei gleicher Motorleistung proportional höheren elektrischen Ströme aus. Diese erfordern größere Leitungsquerschnitte und führen zu Wärmeverlusten sowie insbesondere bei verteilten Topologien zu einer massiven Gewichtszunahme. Dadurch erhöhen sich ebenfalls die Materialkosten und die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit. Besonderes Augenmerk muss der Strombelastbarkeit der Leistungselektronik gelten, die bei Niedervoltsystemen durch zusätzliche Parallelschaltungen kompensiert werden muss. Es existiert ein Break-even-Wert, jenseits dessen ein Hochvoltfahrzeug kostengünstiger herzustellen ist. Untersuchungen ergaben, dass Leistungen bis 40 kW für Spannungsniveaus unter 60 V Kostenverteile mit sich bringen. Für höhere Leistungen sollten Hochspannungssysteme genutzt werden.[29]

Ein geringes Spannungsniveau wird vor allem bei Hybridfahrzeugen mit geringem Elektrifizierungsgrad genutzt. Sogenannte Mikro-Hybride bis zu 5 kW können mit 12 V DC und Mild-Hybride bis zu 20 kW bei 48 V DC betrieben werden. Die Verwendung niedriger Spannungsniveaus ist somit nur für geringe Antriebsleistungen eine sinnvolle Lösung.[30]

Hochvoltsysteme
Wird das elektrische System zum reinelektrischen Fahren genutzt, wie es etwa bei Full-Hybriden, Plug-in-Hybriden, batterieelektrischen oder 0Brennstoffzellenfahrzeugen der Fall ist, werden Leistungen über 50 kW benötigt. Plug-in-Hybride und batterieelektrische Fahrzeuge verwenden aus diesem Grund eine Spannungslage von 300 V bis 800 V DC. Sind bei Kfz aktuell noch 400-Volt-Systeme Stand der Technik, so zeichnet sich mit steigenden Leistungen in der Anwendung im Nutzfahrzeugbereich ein Trend zu 800-Volt-Systemen ab. Deutlich höhere Spannungen kommen aufgrund des Isolationsaufwands und mangels preisgünstiger Bauteile nicht zum Einsatz. Mit hohen Spannungen sinken die elektrischen Ströme proportional, so dass Kupferleitungen, elektrische Kon-

[28] Vgl. Gerling et al. 2017, S. 3.
[29] Vgl. Fritsch et al. 2018, S. 33.
[30] Vgl. Doppelbauer 2020, S. 269f.

takte und Stecker sowie die Leistungselektronik leichter und kostengünstiger verbaut werden können. Im Crash-Fall muss trotz der Beschädigung zahlreicher Komponenten durch aufwendige Isolations- und Schnellentladesysteme eine Gefährdung von Insassen und Rettungskräften ausgeschlossen sein.[31]

6.4 Modularisierung des elektrischen Antriebsstrangs

Der sich beschleunigende Trend der Elektrifizierung der Mobilität wird durch die Notwendigkeit begrenzt, ein Produkt anzubieten, das nicht nur über die Lebensdauer des Fahrzeugs in Form der „Total Cost of Ownership“ einen wirtschaftlichen Vorteil bietet, sondern zumindest für Privatnutzende auch über den Anschaffungspreis. Da die Batterien den größten Kostentreiber bei Elektrofahrzeugen darstellen und es auch in absehbarer Zukunft sein werden, müssen verschiedene Strategien bei der Entwicklung kostenoptimierter elektrischer Antriebsstränge umgesetzt werden, die den Nutzenden funktionale Vorteile und den Herstellern die Möglichkeit zur Steigerung der Gewinnmargen bieten. Eine dieser Strategien ist die Verwendung modularer Konstruktionsprinzipien.

Modulares Design lässt sich definieren als die Zerlegung eines komplexen Systems in vereinfachte Module[32] aus gekoppelten Komponenten, die einzelne Funktionen oder Funktionscluster ausführen. Die fünf Hauptmerkmale des modularen Designs sind in Abb. 6.6 dargestellt. Diese verschiedenen Merkmale haben direkten Einfluss auf die Konstruktion des Antriebsstrangs:

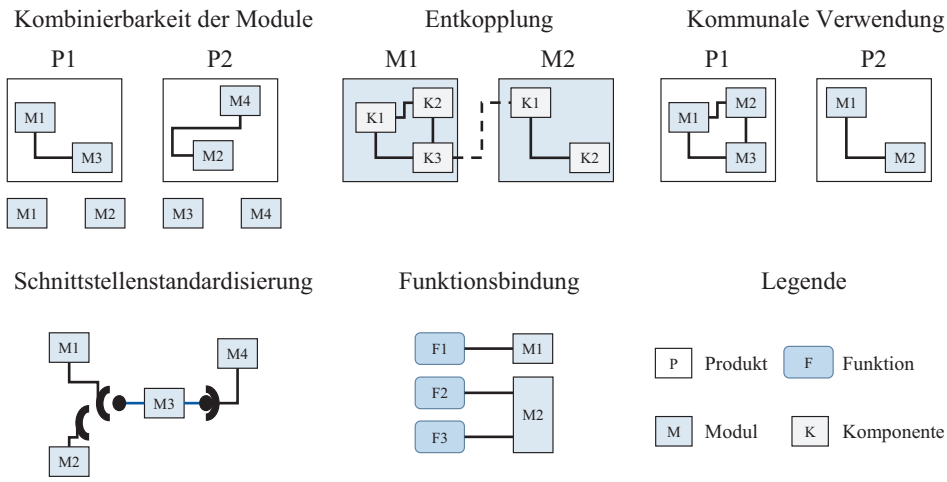


Abb. 6.6 Entwurfseigenschaften modularer Produkte. (Vgl. Krause und Gebhardt 2018)

[31] Vgl. Doppelbauer 2020, S. 270f.

[32] Vgl. Tseng et al. o. J.

- **Entkopplung:** Der Grad, in dem Module miteinander verbunden sind und/oder getrennt werden können, wobei innerhalb eines Moduls zwischen den Komponenten geringere Entkopplungsgrade vorhanden sind. Ein Beispiel sind Batterie-Swap-Konzepte, bei denen die Batterie vom Antriebsstrang entkoppelt und durch eine ähnliche Batterie ersetzt werden kann, ohne die anderen Module zu beeinflussen.
- **Verwendung von Gemeinsamkeiten:** Verwendung von gleichen Modulen in verschiedenen Produktvarianten innerhalb der Produktfamilie. In einem Antriebsstrang kann eine Kommunalität ein Elektromotor sein, der sich je nach eingespeister Spannungsebene für den Antriebsstrang von zwei verschiedenen Fahrzeugklassen verwenden lässt.
- **Kombinierbarkeit:** Erstellung von Produktvarianten durch Kombination oder Weglassen verschiedener Module. Unterstützt durch den Entkopplungsgrad, kann ein leistungsstärkerer Antriebsstrang durch Erhöhung der Motorenanzahl realisiert oder die Reichweite durch sukzessive Hinzunahme von Batteriemodulen erhöht werden.
- **Standardisierung von Schnittstellen:** Ausgehend von der hauptsächlichen Interaktion von Modulen durch den Austausch von Energie, Material oder Informationen können gängige Schnittstellen standardisiert werden, um die Kopplung von Modulen zu erleichtern. Bei einer mechanischen Kopplung zwischen einem Motor und einem Untersetzungsgetriebe werden zum Beispiel genormte (ISO/DIN) Flansche verwendet.
- **Funktionsbindung:** Module können eine Funktion oder eine Reihe von Funktionen zugewiesen bekommen. Das ermöglicht Varianten zur Realisierung unterschiedlicher Funktionen in einer Produktfamilie. So kann ein Schaltmodul dem gleichen Basis-Antriebsstrang eine höhere Steigfähigkeit für Heavy-Duty-Anwendungen ermöglichen.

Die Kombination von Modularitätsmerkmalen schlägt sich in höherer Design-Flexibilität – der Möglichkeit, das Design problemlos zu aktualisieren oder zu ändern – und in reduzierten Design- sowie Produktionskosten nieder. Während also die internen Varianten reduziert werden, kann sich der Hersteller auf die Entwicklung seiner Kernkapazitäten konzentrieren. Das Konzept der Modularität ist in der Automobilindustrie nicht neu, auch nicht im Antriebsstrangdesign. Allerdings hat die Elektrifizierung des Antriebsstrangs die OEMs dazu gezwungen, modifizierte und neue modulare Antriebsstrangplattformen zu schaffen, um die für die Elektrifizierung notwendigen Komponenten zu integrieren.

Es existieren verschiedene Design-Methoden, die für modulare Produkte verwendet werden können: genetische Algorithmen, axiomatisches Design, DSM-Matrix und andere.[33] Gemeinsame Schritte bei diesen Methoden sind die Definition von Modulen und das konzeptionelle Design der Plattform. Als Ergebnis umfangreicher Forschung und Entwicklung in der Antriebsstrangtechnologie sowie der Natur des Systems sind einige grundlegende Module in den meisten, wenn nicht sogar allen Plattformen vorhanden. Durch die Modularisierung wurde die Komplexität des Antriebsstrangs in der gesamten Branche auf einige Grundmodule reduziert.

[33] Vgl. Paes et al. 2018.

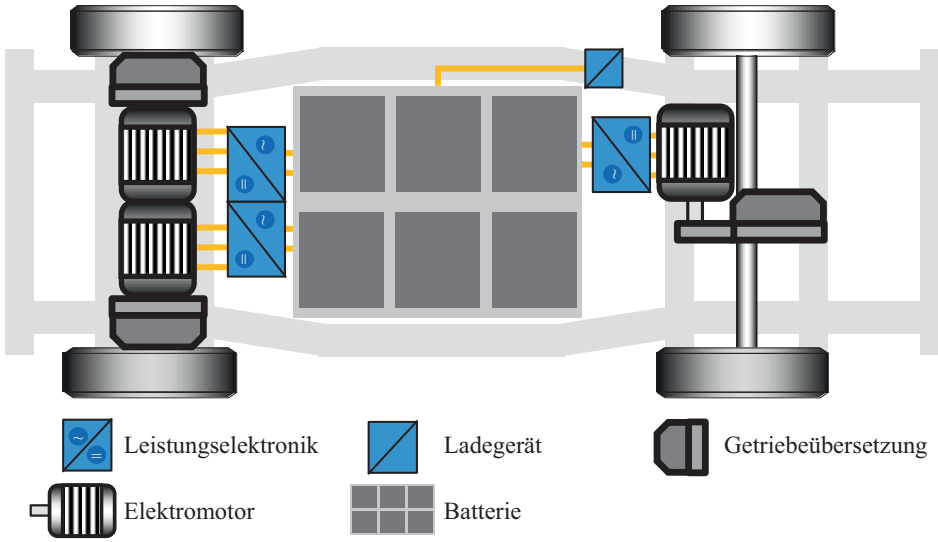


Abb. 6.7 Beispiel für die Architektur einer Elektrofahrzeugplattform

Dies führt dazu, dass die derzeitigen Plattformen für Elektrofahrzeuge eine ähnliche Architektur aufweisen. Bei dieser Architektur, die oft als „Skateboard-Konzept" bezeichnet wird, wird auf einen Verbrennungsmotor, ein Getriebe und eine Kardanwelle verzichtet. Die Batterie ist Teil des Fahrgestells und die Elektromotoren sowie die Leistungselektronik können in der Nähe der Räder untergebracht werden, wie in Abb. 6.7 dargestellt. Die Unterschiede ergeben sich in den genauen Komponenten, aus denen sich die Module zusammensetzen, das heißt: im Preis-Leistungs-Verhältnis. Die gängigsten Module sind die Batterie, die Antriebseinheit, das Ladegerät, die Karosserie und das Thermomanagement.

Gemeinsam mit der Zusammensetzung der Module ist die Varianz des Systems für Hersteller und Nutzende von großer Bedeutung. Dies ergibt sich aus der Analyse der externen Anforderungen des Endanwenders, geclustert in den Anwendungsfällen und der internen Varianz des Unternehmens auf der Suche nach einem wirtschaftlichen Produktangebot in Abhängigkeit von der Lieferkette und den Produktionsprozessen.[34] Daraus werden die Dimensionen der Varianz abgeleitet. Für die Elektromobilität bilden das Gewicht (Klasse) und die Reichweite die beiden wesentlichen von den Herstellern adressierten Design-Dimensionen.

Über die Elektrifizierung des Straßenverkehrs hinaus können Modularisierungskonzepte die Elektrifizierung anderer Mobilitätssektoren vor allem durch die Nutzung von Gemeinsamkeiten, Kombinierbarkeit und Funktionsbindung ermöglichen. Stand der Technik ist es, die Modularisierung des Antriebsstrangs auf Anwendungen zu übertragen, die sich in Reichweite und Gewichtsklasse unterscheiden. Wie in Abb. 6.8 dargestellt,

[34] Vgl. Schuh 2015.

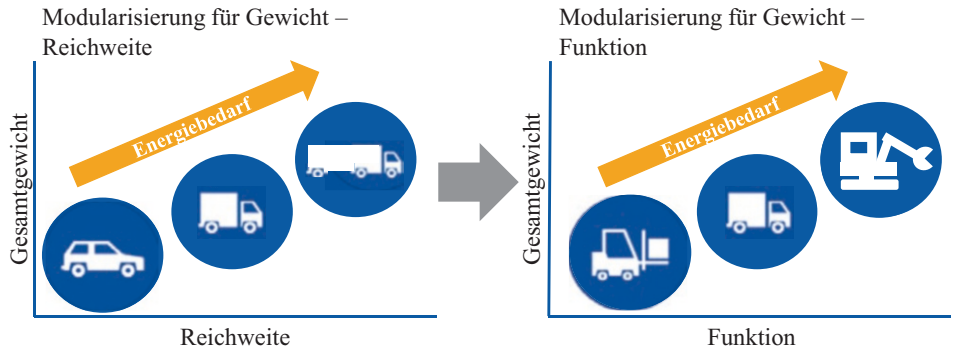


Abb. 6.8 Potenzial des modularen Antriebsstrangs für Gewicht (Klasse), Energie und Funktion

können die von der Modularisierung dominierten Dimensionen allerdings um eine dritte Dimension erweitert werden, in der die Funktionalität integriert wird. Das bedeutet, die Module und Komponenten nicht nur in Abhängigkeit von gewünschter Reichweite (Energie) und Fahrzeugklasse (Gewicht) zu dimensionieren, sondern die Elemente des Antriebsstrangs miteinander zu kombinieren, um weitere Funktionen zu ermöglichen, wie sie für spezifische Bereiche wie etwa Straßenreinigung, Beladung oder diverse Tätigkeiten im Bauwesen benötigt werden.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

ACEA European Automobile Manufacturers Association: *Making the transition to zero-emission mobility*. *2020 Progress Report*, October 2020. Enabling factors for alternatively-powered cars and vans in the european union

Adib, A; Shadmand, M. B; Shamsi, P; Afridi, K. K; Amirabadi, M; Fateh, F; Ferdowsi, M; Lehman, B; Lewis, L. H; Mirafzal, B; Saeedifard, M.:*E-Mobility – Advancements and Challenges*. In: IEEE Access, Jg. 7, 2019, S. 165226–165240

Ajanovic, A; Glatt, A.:*Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität*. In: Elektrotech. Inftech., Jg. 137, 2020, Nr. 4–5Nr., S. 136–146

Doppelbauer, M.: *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020

Fritsch, K.-M; Rieger, D; Warth, M; Scharrer, O.:*48-V-Antriebsmodul für Elektrofahrzeuge*: MTZ 79, 2018

Gerling, D; Patzak, A; Baumgardt, A; Bachheibl, F.:*48-V-Traktion Volle Leistung bei sicherer Spannung*: ATZ extra, 2017

Gerlitz, E; Botzem, D; Weinmann, H; Ruhland, J; Fleischer, J.: *Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2021

ISO: ISO 6469-3:2021Electrically propelled road vehicles – Safety specifications, 2021

James, B. D; Huya-Kouadio, J. M; Houchins, C; Desantis, D. A.: *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update*. Airlington, VA, 2018

Karle, A.: *Elektromobilität Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag, 2015

Krause, D; Gebhardt, N. (Hrsg.):*Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien,* Hamburg: Springer Vieweg, 2018

L. Athanasopoulou, H. Bikas, P. Stavropoulos:*Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion engine and battery electric vehicles*: 6th CIRP Global Web Conference 2018

Lipman, T. E; Weber, A. Z. (Hrsg.):*Fuel Cells and Hydrogen Production. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition.* Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series, New York, NY: Springer New York, 2019

Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehrer, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A.: *From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types*. In: WEVJ, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77

Marenbach, R; Jäger, J; Nelles, D.: *Elektrische Energietechnik. Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik* (Springer eBook Collection). 3., aktualisierte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020

Paes, I; Sabioni, R; Daaboul, J; Le Duigou, J.:*Product and process modular design: a review*. In: Bellemare, J., Carrier, S., Nielsen, K., Piller, F.T. (Hrsg.): Managing Complexity: *Proceedings of the 8th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2015).* 8th International Conference on Mass Customization & Personalization, October 20th-22th, 2015. Montreal, Canada: Springer Vieweg 2018.

Pischinger, S; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Springer eBook Collection). 9., erweiterte und ergänzte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021

Ruf, Y; Baum, M; Zorn, T; Menzel, A; Rehberger, J.: *Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty's High Performance Green Solution*, 2020

Schuh, G.: *Leitfaden zur Baukastengestaltung*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2015

Stan, C.: *Automobile der Zukunft. Mehr als nur elektrisch, digital, autonom.* 1. Aufl. 2021 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021

Thielmann, A; Wietschel, M; Funke, S; Grimm, A.: *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. Karlsruhe, 2020

Töpler, J; Lehmann, J. (Hrsg.):*Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven.* 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017

Trzesniowski, M.: *Antrieb* (Handbuch Rennwagentechnik Ser, v.3). 2nd ed. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019

Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T.: *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen -vom mikrohybrid zum*. [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, 2020

Tseng, M. M; Yue Wang; Roger J. Jiao.: *Modular Design*: CIRP Encyclopedia of Production Engineering

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

