



Peter Fischer, Raphael Weinberger
Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz

Handbuch

Einführung in elektrische und elektrifizierte Fahrzeugantriebe

Graz, Nov. 2022

Vorwort und Danksagung

Dieses Handbuch ist ein Auszug aus der Masterarbeit von Herrn Dipl.-Ing. Raphael Weinberger mit dem Titel „Herausforderung und Möglichkeiten für KFZ-Werkstätten im Übergang zur Elektromobilität. Die Masterarbeit wurde mit Unterstützung der WKO Steiermark durchgeführt.

Das Handbuch ist für den internen Gebrauch der WKO und Ihrer Mitglieder, welche sich für elektrische und elektrifizierte Fahrzeugantriebe interessieren, speziell

- für Einsteiger:innen aus Praxis und Theorie,
- für interessierte Techniker:innen mit bestehenden Erfahrungen zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen,
- zur Vermittlung von Systemverständnis für Elektrofahrzeuge, deren Einbettung in Infrastruktur und Wandel der Technologien,
- zur Übersicht über Funktionsweisen und Herausforderungen der wesentlichen Komponenten
- als Nachschlagewerk für typische Kennwerte,
- als Ergänzung für Lehrunterlagen.

Die Zusammenstellung der Themen entstand aus unzähligen Diskussionen mit Techniker:innen und Studierenden, welche aufzeigten, worin die wesentlichen Fragen und Informationsbedarfe zu elektrischen Antrieben bestehen. Der Text soll die grundlegenden technischen Zusammenhänge einfach und verständlich aufbereiten und einen Ausgangspunkt für die vertiefte Beschäftigung mit dem Thema bieten. Das Handbuch enthält zahlreiche Hinweise für vertiefende Literatur und aufgeführte Beispiele.

Bei weitergehendem Interesse an Herausforderungen und Ansätzen für neue Geschäftsmöglichkeiten durch E-Mobilität wird auf die Masterarbeit von Raphael Weinberger verwiesen.

Besonderer Dank dafür gilt Frau Mag. Barbara Leitner, Landesinnungsgeschäftsführerin der Wirtschaftskammer Steiermark für Metall/KFZ/Gesundheit, für die Abwicklung und finanzielle Unterstützung Masterarbeit. Herzlicher Dank gilt Herrn Thomas Marichhofer, Landesinnungsmeister der Wirtschaftskammer Steiermark und Herrn Ing. Klaus Edelsbrunner, Bundesgremialobmann der Wirtschaftskammer Österreich für die fachliche Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Abkürzungen	iv
1. Architekturen und Funktionsweisen	5
1.1 Batterie-Elektrische-Antriebe	5
1.1.1 Antriebsarchitekturen	7
1.1.2 Fahrzeugarchitekturen und Plattformstrategie	10
1.2 Brennstoffzellen-Elektrische-Antriebe	18
1.2.1 Antriebsarchitekturen für Brennstoffzellenfahrzeuge	22
1.2.2 Fahrzeugarchitekturen	23
1.3 Hybrid-Elektrische-Antriebe	26
1.3.1 Funktionen und Strategien hybrider Antriebsstränge	28
1.3.2 Klassifizierung nach Hybridarchitekturen.....	30
1.3.3 Klassifizierung nach Elektrifizierungsgrad	35
1.3.4 Ausgeführte Hybridfahrzeuge	44
2. Komponenten elektrischer Antriebssysteme.....	61
2.1 Energiespeicher	61
2.1.1 Lithium-Ionen-Batterie	65
2.2 Elektrische Maschinen.....	90
2.2.1 Ausgeführte Beispiele von elektrischen Maschinen	97
2.3 Leistungselektronik	103
2.4 Getriebe.....	111
2.4.1 Ausgeführte Getriebe für elektrische Achsantriebe.....	112
2.4.2 Ausgeführte Hybridgetriebe.....	115
3. Systemfunktionen	122
3.1 Bordnetz	122
3.2 Thermomanagement.....	134
3.3 Ladetechnik	146
A. Anhang.....	154
A.1 Hochvoltausbildung	154
Abbildungsverzeichnis.....	156

Tabellenverzeichnis	160
Literaturverzeichnis	160

Abkürzungen

°C	Grad Celsius
A	Ampere
AC	Wechselstrom
Ah	Amperestunden
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BMS	Batterie-Management-System
CCS	Combined Charging System
CHAdeMO	Charge de Move
cm ³	Kubikzentimeter
DC	Gleichstrom
DoD	Depth of Discharge
g	Gramm
h	Stunden
I	Stromstärke
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
l	Liter
m	Meter
mm	Millimeter
Nm	Newtonmeter
PSM	permanent erregte Synchronmaschine
R	Widerstand
s	Sekunden
SoC	State of Charge (Ladezustand)
SoF	State of Function
SoH	State of Health (Gesundheitszustand)
U	Spannung
U/min	Umdrehungen pro Minute
V	Volt
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VKM	Verbrennungskraftmaschine
W	Watt
Wh	Wattstunden
µm	Mikrometer

1. Architekturen und Funktionsweisen

In diesem Abschnitt werden die Architekturen und Funktionsweisen von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebssystem beschrieben. Die Architekturen werden dabei in Antriebs- und in Fahrzeugarchitekturen unterteilt. Der Fokus liegt hierbei auf rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen sowie auf Hybridfahrzeugen. Außerdem wird auch ein Einblick in die Technologie der Brennstoffzellen-Elektrischen-Fahrzeuge gegeben. Alle nachfolgenden Architekturen haben jedoch keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung der Ausführungsmöglichkeiten, sondern verschaffen nur einen grundlegenden Einblick in diese Thematik.

1.1 Batterie-Elektrische-Antriebe

Ein batterieelektrisch betriebenes Straßenfahrzeug nutzt elektrische Energie, welche in einem Batteriesystem mitgeführt wird. Der Speicherbedarf wird dabei vollständig durch den Akkumulator gedeckt. Unter Akkumulator wird in diesem Zusammenhang das Batteriesystem bezeichnet. Der dafür benötigte Strom wird primär vom elektrischen Netz in das Batteriesystem geladen. Hierfür kommen verschiedene Lademöglichkeiten zum Einsatz. Eine permanente Energieversorgung mittels Stromschiene, Oberleitung oder Induktion ist möglich, aber findet in der Regel bei Straßenfahrzeugen noch geringe Anwendung. Der Antrieb eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs erfolgt ausschließlich über eine oder mehrere Elektromaschinen. Außerdem verfügt ein solches Fahrzeug über die Fähigkeit, die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsvorgang, welche bei einem konventionellen Antrieb mit VKM verloren geht, zurückzugewinnen und in das Batteriesystem einzuspeisen. Dieser Vorgang wird als Rekuperation bezeichnet. Durch das Fehlen der Geräuschkomponenten des Verbrennungsmotors sind die Innengeräusche eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich leiser als bei vergleichbaren Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb. Vor allem im Stadtbereich ist eine Reduktion von Geräuschemissionen positiv. Allerdings werden Elektrofahrzeuge bei geringen Geschwindigkeiten sehr schwer oder gar nicht akustisch wahrgenommen, was sich negativ auf den Fußgängerschutz auswirken könnte. Jedoch überwiegen bei höheren Geschwindigkeiten die Wind- und Fahrgeräusche, sodass das Geräuschverhalten hier den konventionellen Fahrzeugen nahekommt. Durch den Wegfall von Verschleißteilen verändern sich auch die Reparatur- und Servicemöglichkeiten an einem Elektrofahrzeug. Aus diesem Grund ist eine Veränderung der Kompetenzen und Fähigkeiten des Werkstattpersonals erforderlich, um Reparaturen durchführen zu können. [7] [14] [15]

Übersicht Komponenten und Systemfunktionen

Eine Übersicht der Basiskomponenten eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs ist in Abbildung 1-1 ersichtlich.

Die Aufgabe von einem Energiespeicher ist das Mitführen von Energie im Fahrzeug, die zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden soll. Die dabei mitgeführte elektrische Energie wird als Gleichstrom in einem Batteriesystem gespeichert. Es kommen zumeist Akkumulatoren basierend auf der Lithium-Ionen Technologie zum Einsatz. Der DC/DC Wandler, auch Gleichrichter genannt, wird zur Umwandlung der Traktionsnetzspannung (= Spannung für den Antrieb) in Niederspannung eingesetzt. Dadurch versorgt dieser das 12 Volt Bordnetz kontinuierlich mit elektrischer Leistung, um Verbraucher wie Innenbeleuchtung, Fahrassistenzsysteme, Zentralverriegelung, Servolenkung oder Vakuumpumpe

für den Bremskraftverstärker zu betreiben. Hierfür wird in der Regel zusätzlich eine konventionelle Blei-Säure Batterie eingesetzt. Diese 12-Volt-Batterie ist des Weiteren erforderlich, um bei Start des Fahrzeugs nach automatischer Sicherheitsprüfung das Hochvoltspannungsbordnetz zu aktivieren. [7]

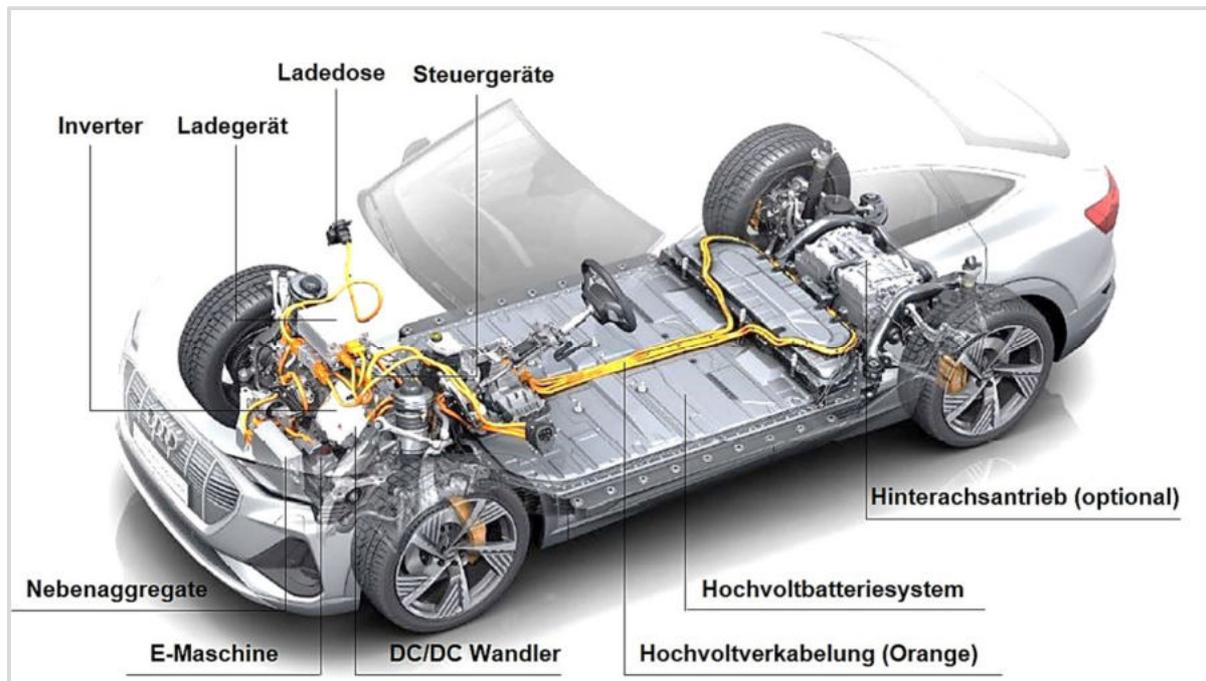


Abbildung 1-1: Hauptkomponenten von einem Batterie-Elektrischen-Fahrzeug – Beispielfahrzeug Audi e-tron [2]

Die Aufgabe des Inverters, oder Umrichter genannt, besteht darin um in Antriebsphasen den Gleichstrom des Batteriesystems in Wechselstrom für die Elektromotoren (Traktionsmaschinen) umzuwandeln. In Verzögerungsphasen hingegen wird der Umrichter dafür verwendet, um den durch Rekuperation erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, sodass dieser in das Batteriesystem eingespeist werden kann. Um die mitgeführte elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln, werden elektrische Maschinen eingesetzt. Im Falle einer Bremsung wird die E-Maschine im Generatorbetrieb verwendet, um die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie umzuwandeln. Dieser Vorgang nennt sich Rekuperation und ist ein wesentlicher Bestandteil im Energiemanagement eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs. Der Bremsvorgang ist ein Zusammenwirken von Reibungsbremse und elektrischer Rekuperation. Die Auslegung der Reibungsbremse ist abhängig vom Rekuperationspotential sowie vom Batteriemanagementsystem. Des Weiteren ändert sich das Verschleißverhalten der Reibungsbremse, wodurch andere Materialien zum Einsatz kommen können. Um das bestmögliche Rekuperationspotential auszunutzen, können elektromechanische Bremsen eingesetzt werden, anstatt wie bisher hydraulische Bremsen. [14] [15]

Um alle Funktionen der Komponenten in Abhängigkeit vom Fahrerwunsch, Fahrsituation und Betriebsbedingungen zu koordinieren, ist ein elektronisches Antriebsstrangmanagement erforderlich. Dafür ist eine Betriebsstrategie notwendig, um neben Einhaltung der Fahrervorgaben auch einen möglichst geringen Energieverbrauch zu erreichen. Dafür kommen unterschiedliche Steuergeräte zum Einsatz, welche mithilfe mehrerer Bussysteme miteinander kommunizieren. Im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor kommt bei batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen dem Thema Thermomanagement eine erhöhte Bedeutung zu. Speziell beim Schnellladen und Fahrsituationen mit hohem Leistungsbedarf entstehen zum Teil hohe Verlustleistungen, wodurch sich die Temperatur im Batteriesystem erhöht. Zur aktiven Überwachung der Batteriekühlung wird ein

Batteriemanagementsystem eingesetzt, welches den Ladevorgang und alle anderen Batteriefunktionen zeitlich steuert. Je nach Umgebungstemperatur muss das Batteriesystem elektrisch beheizt oder gekühlt werden, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Komponenten, wie Elektromaschine und Leistungselektronik, werden ebenso aktiv überwacht und gekühlt. Für die Kühlung sowie die Beheizung der Fahrzeugkabine muss ein Teil der elektrischen Leistung zur Verfügung gestellt werden, um Nebenaggregate wie Hochvolt-Luftheizer, Hochvolt-Klimakompressoren und Kühlmittelpumpen zu betreiben. [14] [15]

Um das Laden der Hochvoltbatterie mit Wechselstrom zu ermöglichen, ist ein Ladegerät integriert, welches den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt. Im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb mit Verbrennungskraftmaschine werden Nebenaggregate vom Hochspannungsbordnetz oder vom 12-Volt Bordnetz elektrisch angetrieben, anstatt mechanisch mittels Riementriebes. [14] [15]

1.1.1 Antriebsarchitekturen

Das Antriebssystem eines Fahrzeugs setzt sich aus allen Komponenten zusammen, welche Leistung für den Antrieb produzieren, übertragen und im Gegenzug wieder zurückspeichern können. Die grundsätzliche Antriebsstrang-Architektur von einem Batterie-Elektrischen-Fahrzeug ist in Abbildung 1-2 dargestellt. Die Bereitstellung der elektrischen Energie erfolgt mit einem für den Anwendungsfall spezifischen Energiespeicher. Die Leistungselektronik übernimmt eine zentrale Rolle im elektrischen Antriebsstrang zur Wandlung von Frequenz, Spannung und Phasenlage des Stromes und bildet somit die Basis für die Regelung der Elektromaschinen. Die Regelung der E-Maschine erfolgt über eine dafür geeignete Steuereinheit. [7] [14] [15]

Um den sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden viele Messgrößen erfasst. Eine sehr wichtige Messgröße ist dabei die Position und die Drehzahl vom Rotor der E-Maschine. Des Weiteren wird der Phasenstrom sowie die Temperatur der E-Maschine erfasst, um zum einen das geforderte Drehmoment einzustellen und zum anderen die E-Maschine vor Überlast zu schützen. [3]

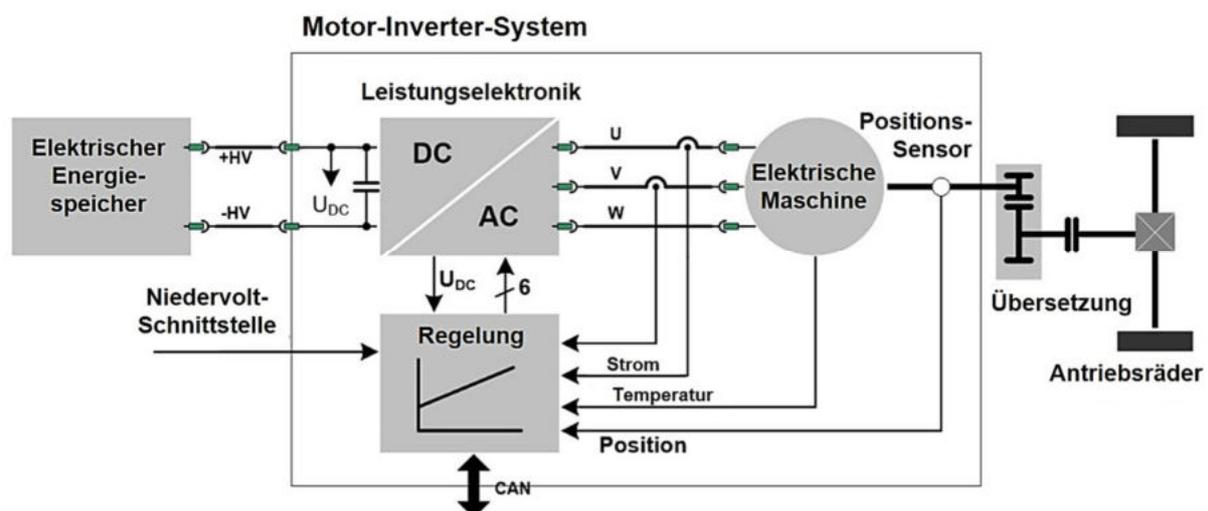


Abbildung 1-2: Antriebsstrang-Architektur von einem allgemeinen Batterie-elektrischen-Fahrzeug [3]

Die elektrischen Maschinen werden meist als dreiphasige permanenterrregte Synchronmaschinen oder als Asynchronmaschinen ausgeführt. Um die Drehmomente und Drehzahlen der Elektromaschine an die Bedarfe am Rad anzupassen, sind auch bei reinem Elektroantrieb Übersetzungen in Form von Stirnrädern und Differential notwendig. Hierfür wird meist eine fixe einstufige Übersetzung oder in

manchen Fällen auch ein Zweiganggetriebe verwendet. Letzteres findet Anwendung, um in Abhängigkeit der verwendeten E-Maschine eine große Spreizung von Drehzahl und Drehmoment zu erreichen. Zusätzlich können günstigere Gesamtwirkungsgrade erzielt werden, um die Reichweite zu erhöhen. Ein Anfahrlement, wie beispielsweise eine Reibungskupplung ist im Vergleich zu einem konventionellen Antriebsstrang nicht notwendig. [7]

Im Folgenden werden grundsätzliche Ausführungsmöglichkeiten von Antriebsarchitekturen für Batterie-Elektrische-Fahrzeuge anhand Abbildung 1-3 aufgezeigt. Eine Variante ist der elektrische Achsantrieb oder auch E-Achse genannt. Die elektrische Maschine ist dabei koaxial, achsparallel oder orthogonal zur Abtriebsachse des Getriebes angeordnet. Dabei befinden sich die antriebsrelevanten Komponenten E-Maschine, Getriebe und Leistungselektronik kompakt auf einer Achse. Eine weitere Variante ist der Radnabenantrieb, wo alle Komponenten des Antriebs kompakt in der Felge integriert sind und optional auch mit einem Getriebe ausgeführt werden können. [4]

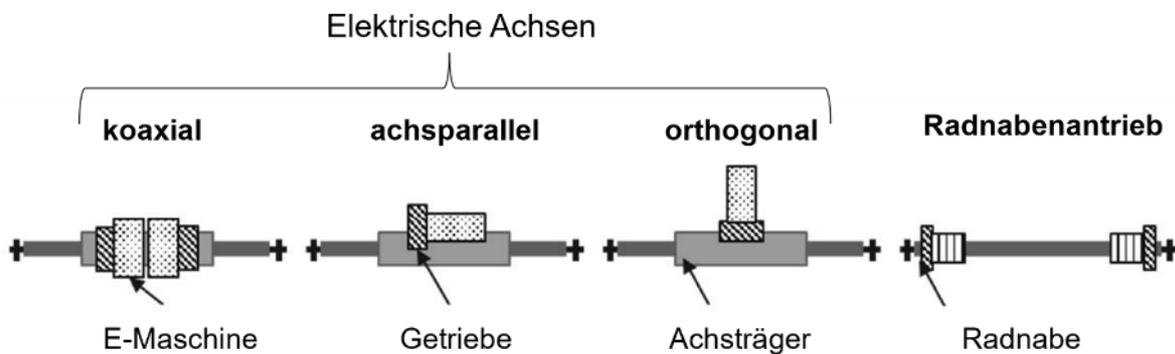


Abbildung 1-3: Ausführungen von Antriebsarchitekturen von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen [4]

In Abbildung 1-4 ist ein realisierter elektrischer Achsantrieb für reine Elektrofahrzeuge mit achsparalleler Anordnung der E-Maschine dargestellt. Das Antriebssystem umfasst neben der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik ein mechanisches zweistufiges nicht schaltbares Stirnradgetriebe sowie ein Kegelraddifferential. Als Bremsmechanismus im Stillstand dient eine Parksperre, welche auf die Getriebeeingangswelle wirkt. [5]

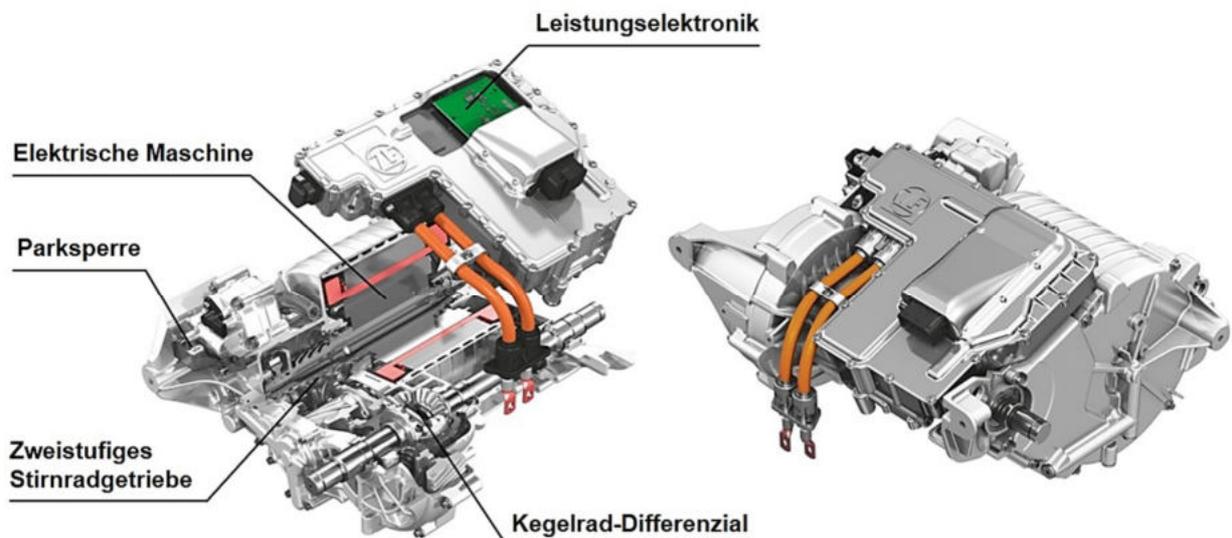


Abbildung 1-4: Ausgeführtes achsparalleles elektrisches Achsantriebssystem - eVD2 von ZF [5]

Sowohl die E-Maschine als auch das Stirnradgetriebe mit Differential befinden sich in einem gemeinsamen Gehäuse mit Deckel an den Seiten. Somit besteht die Möglichkeit der individuellen Demontage der Komponenten für Reparatur- oder Wartungszwecke. Dadurch, dass die Motorwelle direkt als Getriebeeingangswelle genutzt wird, können Lagerstellen reduziert werden. Dies hat zur Folge, dass neben einer Gewichtseinsparung auch das Geräuschverhalten verbessert wird. Eine solche achsparallele Antriebskonfiguration ermöglicht im Vergleich zur coaxialen Anordnung eine erhöhte Bodenfreiheit. Bei einer axialen Länge von ca. 450mm erreicht diese Antriebseinheit eine maximale Leistung von 150kW. [5]

Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz eines elektrischen Achsantriebs ist die Anwendung in Hybridfahrzeugen. Ein Beispiel dafür ist der BMW i8. Dies ist ein Sportfahrzeug mit Plug-In-Technologie. Dabei treibt ein Verbrennungsmotor die Hinterachse über ein 6-Gang-Automatikgetriebe an. Die Vorderachse wird durch eine achsparallele permanenterrregte Synchronmaschine und ein schaltbares zweistufiges 2-Gang-Getriebe angetrieben, siehe Abbildung 1-5. Die elektrische Vorderachse wird zur Unterstützung beim Beschleunigungsvorgang sowie zum rein elektrischen Fahren verwendet. Das schaltbare Zwei-Ganggetriebe wird im Kapitel „6.2.4 Getriebe“ näher erörtert. [6]

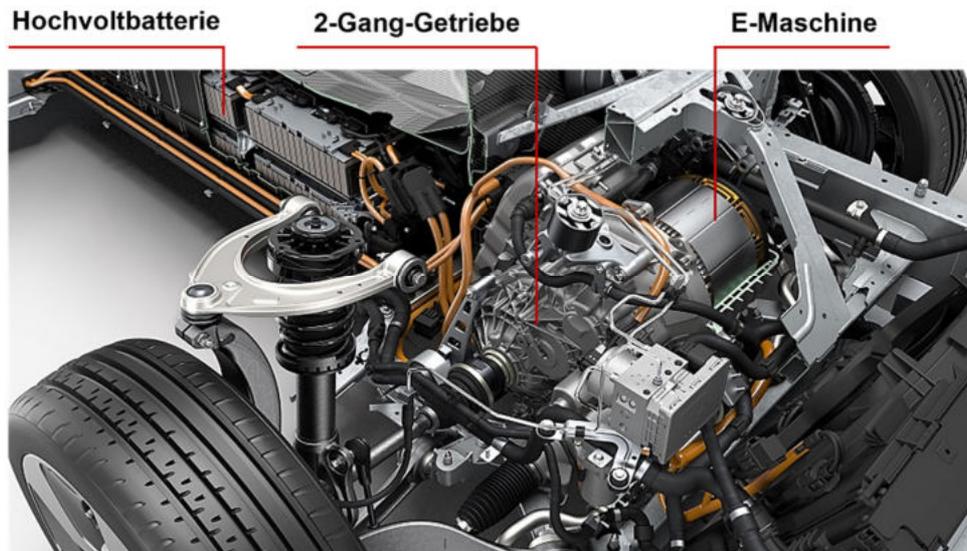


Abbildung 1-5: Vorderachse des BMW i8 mit Elektromaschine und 2-Gang-Getriebe [6]

Beim Radnabenantrieb werden alle antriebsrelevanten Komponenten wie E-Maschine, Leistungselektronik und optional auch ein coaxiales Getriebe kompakt in die Felge integriert. Dadurch entstehen neue Möglichkeiten für Raum- und Packaging-Konzepte. Des Weiteren können im Vergleich zur elektrischen-Achse mit geringem Aufwand Front,- Heck,- oder Allradantriebssysteme umgesetzt werden. Die Funktion des Achsdifferentials wird durch selektive Einstellung der Raddrehmomente der E-Maschinen realisiert. Durch eine gezielte Momentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse sowie zwischen den beiden Rädern einer Achse kann das Fahrverhalten verbessert werden. Durch Integration eines Planetengetriebes zwischen Elektromaschine und Rad ist es möglich, die E-Maschine mit höherer Drehzahl und gleicher Leistung zu betreiben. Dies ermöglicht eine erheblich kleinere Ausführung des Antriebsmotors und damit eine Reduzierung der E-Maschinenmasse. [7]

Auch den Radnabenantrieb ermöglicht die Rückgewinnung der Bremsenergie durch Rekuperation. Meist ist eine zusätzliche mechanische Reibungsbremse verbaut, um eine ausreichende Sicherheit beim Bremsvorgang zu gewährleisten.

Eine große Herausforderung bei Radnabenantrieben sind die deutlich höheren ungefederten Massen, welche sich nachteilig auf die Fahrdynamik auswirken und die Wärmeabfuhr aus Bremse und Motor. Des Weiteren variiert durch unterschiedliche Aufstandskräfte und die ungefederten Massen der Luftspalt zwischen Stator und Rotor der E-Maschine, welcher wesentlichen Einfluss auf die Effizienz eines Elektromotors hat. Es ist ein erhöhter Aufwand für das Motorkühlkonzept zu erwarten. Um die möglichen Auswirkungen durch Wasser oder Schnee auf ein solches System zu verhindern, ist ein geeignetes Abdichtungskonzept erforderlich. [7]

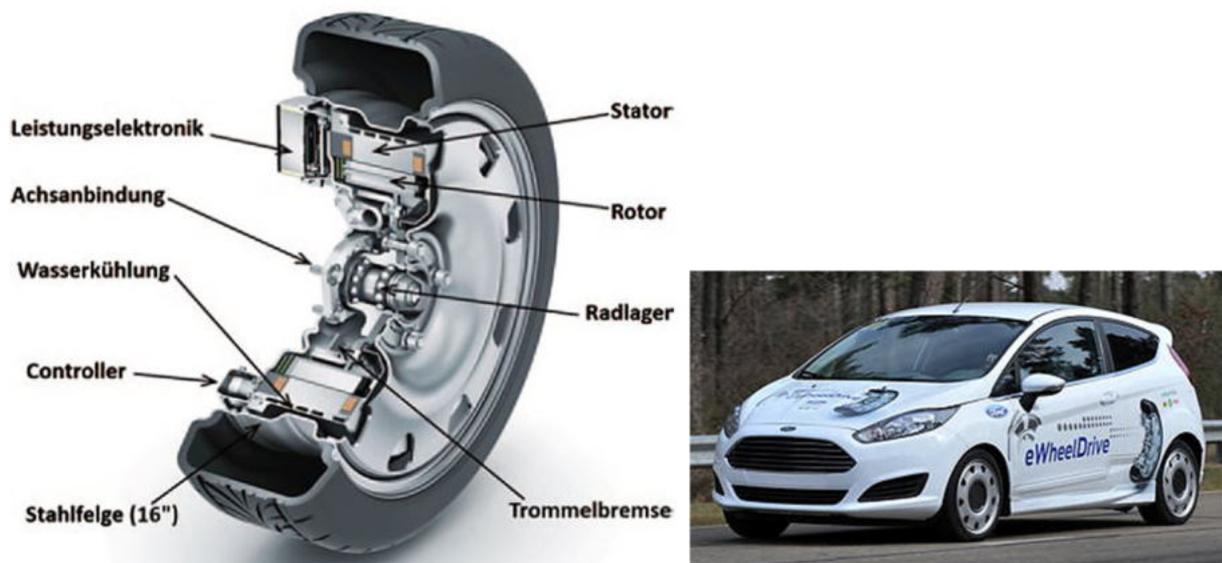


Abbildung 1-6: Ausgeführter Radnabenantrieb der eWheel Drive von Schaeffler [7]

Eine Ausführungsmöglichkeit eines Radnabenantriebs zeigt Abbildung 1-6. Hierbei handelt es sich um den eWheel-Drive von Schaeffler. Es ist ersichtlich, dass der zur Verfügung stehende Bauraum bestmöglich genutzt werden muss, um alle Komponenten in der Radnabe unterzubringen. Als mechanische Bremse wird eine Trommelbremse eingesetzt. Zur Wärmeabfuhr wird über schmale Kühlkanäle im Stator der E-Maschine eine Flüssigkeitskühlung eingesetzt. Die Leistungselektronik sowie der Motor-Controller sind ebenfalls kompakt an der Felgeninnenseite integriert. Der Antriebsmotor stellt eine maximale Leistung von 40 kW zur Verfügung und das maximale Drehmoment beträgt dabei bis zu 700 Nm. Die 16-Zoll-Radnabenantriebseinheit erreicht ein Gewicht von 53 kg und ist damit um rund 45 kg schwerer als ein konventionelles Rad bestehend aus Felge und Reifen. [7]

1.1.2 Fahrzeugarchitekturen und Plattformstrategie

Die Fahrzeugarchitektur bezieht sich auf die Gesamtheit aller Systeme und deren Unterbringung im Fahrzeug. Die im Gesamtsystem verwendeten Komponenten sind dabei voneinander abhängig. Auf System- und Komponentenebene ergeben sich massive Änderungen der Fahrzeugarchitektur eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine. So werden herkömmliche Komponenten wie Verbrennungsmotor, Getriebeeinheit, Kraftstofftank und Abgassystem mit den zugehörigen Steuergeräten aus dem Fahrzeug entfernt, um neue Baugruppen implementieren zu können. Diese setzen sich aus dem elektrischen Antriebsstrang mit Hochvolt-Batteriesystem, der Bordnetzarchitektur, dem Thermomanagementsystem, dem Ladesystem und den Nebenaggregaten mit allen erforderlichen Steuergeräten zusammen. Wenige Komponenten wie Lüfter, Kühl- und Heizkreisläufe und diverse

Verkabelungen kommen in modifizierter Ausführung zum Einsatz. Die Hochvoltverkabelung in batterieelektrischen Fahrzeugen ist mit der Farbe Orange gekennzeichnet. [8]

Die Unterbringung der neuen Fahrzeugkomponenten ist überwiegend davon abhängig, welche Plattformstrategie umgesetzt werden soll. Im Allgemeinen existieren dazu zwei unterschiedliche Ansätze.

(a) Conversion-Design

Elektrofahrzeuge können auf der Grundlage bestehender Fahrzeugplattformen mit Verbrennungskraftmaschine entwickelt werden.

(b) Purpose-Design

Eine andere Möglichkeit ist die vollständige Neuentwicklung einer Plattform für batterieelektrische Fahrzeuge.

Dafür verfolgen die Hersteller unterschiedliche Ansätze und Strategien zur Umsetzung. Zu Beginn der Entwicklung eines neuen Elektrofahrzeugs muss demnach eine Entscheidung getroffen werden, ob eine bereits bestehende Plattform als Basis für ein Conversion-Design genutzt wird oder eine völlig neuartige Plattform, welche auf die Charakteristik des E-Fahrzeugs abgestimmt ist, entwickelt wird. Die Neuentwicklung einer E-Fahrzeugplattform wird als Purpose-Design bezeichnet. Der Vorteil dieser zweckorientierten Plattform beruht auf der Möglichkeit einer vollkommen neuen Anordnung der Komponenten im Fahrzeug. Demgegenüber stehen die höheren Forschungs- und Entwicklungskosten. Beim Conversion-Design ist die Integrationsfähigkeit der Hochvoltkomponenten in die bestehenden Platzverhältnisse und Bordnetzinfrastruktur meist ein entscheidende Faktor. [8]



Abbildung 1-7: (a) Conversion Design links: VW e-Golf und (b) Purpose Design rechts: VW MEB-Plattform [9]

In Abbildung 1-7 sind diese beiden unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten gegenübergestellt. Als Beispiel für ein Conversion Design (a) wird von Volkswagen der e-Golf herangezogen. Dadurch, dass die Komponenten des verbrennungsmotorischen Antriebs überflüssig werden, entsteht neues verfügbares Volumen für die Komponenten des E-Antriebs, aber auch räumliche Einschränkungen. Um Erfahrung zu sammeln, bietet das Conversion Design einen wichtigen Zwischenschritt in der Neuentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit das gleiche Fahrzeug entweder als Variante mit Verbrennungsmotor oder als batterieelektrische Variante auszuführen. Anwendung findet es hauptsächlich bei Klein- und Kompaktfahrzeugen und ist am besten für Kleinserien geeignet. [8]

Zur Veranschaulichung für ein Purpose Design (b) wird der modulare Elektrifizierungs-Baukasten (MEB) von Volkswagen verwendet. Das Batteriesystem ist zwischen den beiden Achsen im Unterboden des

Fahrzeugs untergebracht. Die einzelnen Batteriemodule befinden sich in einem Batteriegehäuse, welches zum Unfallschutz beiträgt und die Fahrzeugsteifigkeit begünstigt. Dieses Unterbodenkonzept ist aktuell Stand der Technik von Fahrzeugplattformen mit rein elektrischem Antrieb. Dadurch resultiert eine vorteilhafte Gewichtsverteilung mit einem tiefer liegenden Gesamtschwerpunkt des Fahrzeugs. Die elektrischen Achsantriebseinheiten können sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse angeordnet werden oder als Allradsystem ausgeführt werden. Eine solche Plattform weist aufgrund der modifizierten Fahrzeugfront aerodynamische Vorteile auf, da die Kühleinlässe stark reduziert sind oder erst gar nicht vorhanden sind. Besonders bei Überland- und Autobahnfahrten kommt dem Luftwiderstand eine erhöhte Bedeutung zu, da dieser sich erheblich auf die Reichweite auswirkt. [9]

Typischerweise wird eine Purpose-Design-Plattform für mehrere Fahrzeugklassen verwendet. Dafür ist es erforderlich, dass ausgewählte Hauptkomponenten des elektrischen Antriebstrangs als modulare Baukastensysteme zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass Batteriesystem, E-Maschine, Inverter sowie Getriebe in verschiedenen Ausführungsvarianten in dieselbe Fahrzeugplattform integriert werden können. So könnte zum Beispiel der Maschinentyp, die Leistungsklasse sowie die Spannungsklasse der E-Maschine variieren. Um unterschiedliche Reichweiten der Fahrzeugklassen zu ermöglichen, können modulare Batteriesysteme mit unterschiedlichen Kapazitäten, Spannungsklassen sowie Zelltypen eingesetzt werden. Außerdem kann durch Einsatz einer modularen Getriebeeinheit mit 1-Gang- oder 2-Gang-Ausführung der Drehmoment- und Drehzahlbereich erweitert werden und in Abhängigkeit der Fahrsituation der Gesamtwirkungsgrad gesteigert und somit die Reichweite erhöht werden. Diese Möglichkeiten bieten Vorteile bei der individuellen Ausführung einer neuen Fahrzeugklasse mit unterschiedlichen Spezifikationen in Bezug auf die Antriebstopologie, Leistung und Reichweite. [8] [9]

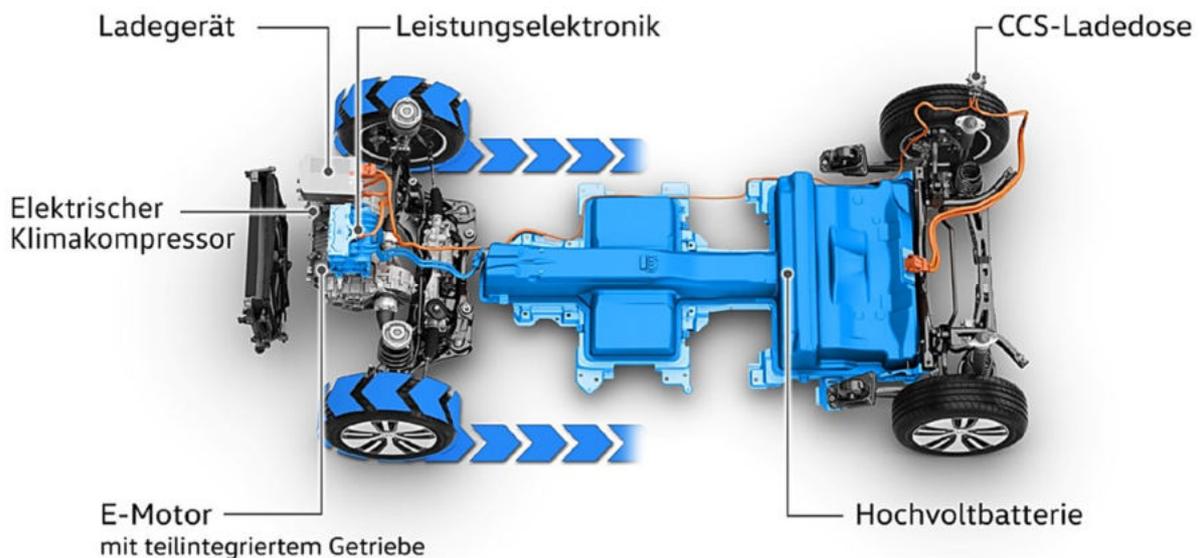


Abbildung 1-8: Elektrischer Antriebstrang vom VW e-Golf als Conversion Design [10]

Als detailliertes Ausführungsbeispiel für ein Conversion-Design wird die Fahrzeugplattform des VW e-Golfs anhand Abbildung 1-8 ausführlich betrachtet. Die Hauptbestandteile des elektrischen Antriebstrangs bestehen aus der achsparallelen E-Maschine mit teilintegriertem Getriebe, der wassergekühlten Leistungselektronik und dem Hochvoltbatteriesystem. Neben der elektrischen Frontantriebseinheit befinden sich die elektrisch betriebenen Nebenverbraucher im vorderen Bereich

des Fahrzeugs. Diese umfassen u.a. den Klimakompressor, den Bremskraftverstärker, das Ladegerät sowie das Antriebsteuergerät. [10]

Dadurch, dass das gesamte Abgassystem inklusive Nachbehandlungssystem sowie der Kraftstofftank aus dem Fahrzeug ausscheiden, entsteht neuer nutzbarer Raum sowohl im Fahrzeugtunnel als auch im Heckbereich. Dieses neu zur Verfügung stehende Bauvolumen wird für die Integration der Batteriemodule verwendet. Mittels der CCS-Ladesteckdose, welche sich im hinteren Fahrzeugbereich befindet, lässt sich das Batteriesystem mit Wechsel- sowie direkt mit Gleichstrom laden. Das Ladegerät zum Laden mit Wechselstrom ist im Motorraum des Fahrzeugs integriert. Die Höchstgeschwindigkeit dieses Fahrzeugs beträgt 150 km/h. [10]

In Abbildung 1-9 ist der zugehörige elektrische Achsantrieb dargestellt. Die E-Maschine ist dabei achsparallel zum Getriebeabtrieb angeordnet. Der Elektromotor ist als dreiphasige permanent erregte Synchronmaschine ausgeführt. Dieser erreicht ein maximales Drehmoment von 290 Nm und eine maximale Drehzahl von 12.000 U/min, um eine maximale Leistung von 100 kW zu generieren. Die Effizienz des Antriebs beträgt in großen Bereichen des Maschinenkennfelds über 90 Prozent. Für die Wärmeabfuhr ist im Motorgehäuse ein Kühlmantel für die Flüssigkeitskühlung eingebettet. Zur Regelung der E-Maschine ist die Erfassung der Rotordrehzahl und Rotorwinkelstellung erforderlich. Hierfür ist im rechten Lagerschild ein Rotorlagegeber integriert. Um die Drehzahl der E-Maschine für den Antrieb der Räder zu übersetzen, kommt ein zweistufiges Ein-Gang-Getriebe mit Differential zum Einsatz. [10]

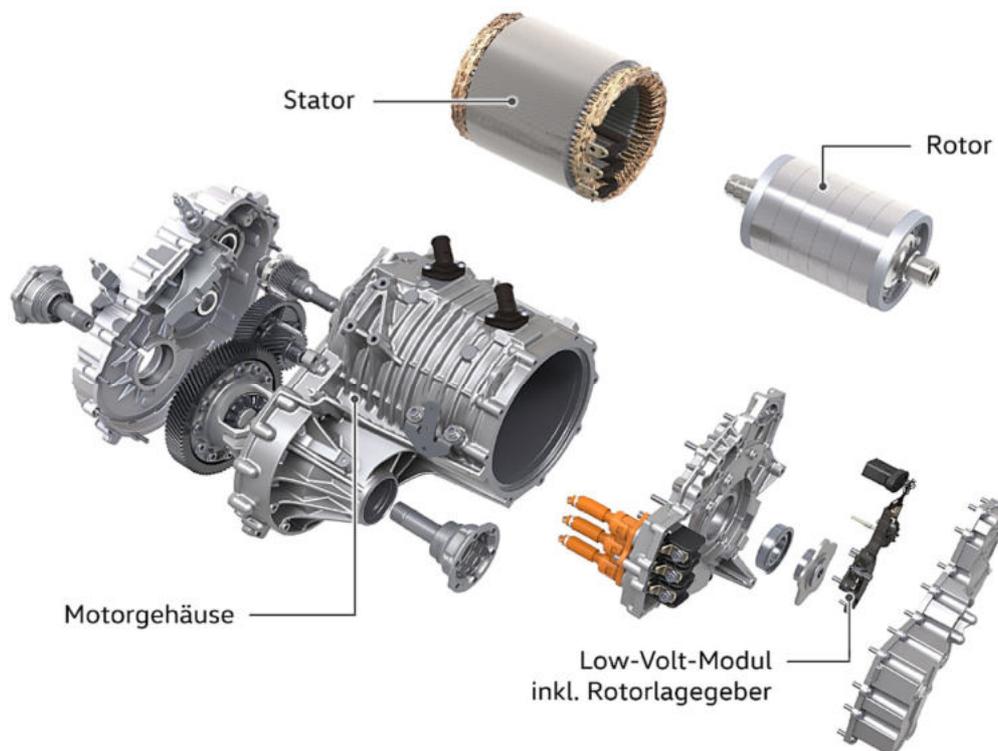


Abbildung 1-9: Elektrische Achsantriebseinheit vom VW e-Golf [10]

Zur Maximierung der Integrationsdichte, wird das Gehäuse des Elektromotors als eine Gehäusehälfte der Getriebeeinheit verwendet. Die Rotorwelle der E-Maschine ist zugleich die Getriebeeingangswelle und nur mit einer Lagerstelle ausgeführt, um Reibungsverluste zu minimieren. Alle Getriebekomponenten werden mit Hilfe einer Trockensumpfschmierung mit Öl versorgt. An der

Eingangswelle des Getriebes ist eine mechanische Parksperre angeordnet. Das Gesamtgewicht dieser Achsantriebseinheit beträgt 109 kg. [10]

Der Energiespeicher basiert auf der Lithium-Ionen-Technologie und ist in Abbildung 1-10 ersichtlich. Das Hochvoltbatteriesystem besteht aus insgesamt 264 prismatischen Zellen, welche zu Zellmodulen zusammengefasst sind. Das Batteriesteuergerät dient zur Sicherstellung der Funktionssicherheit des Batteriesystems. Dafür werden ausgewählte Zellmodule überwacht, um Spannung und Temperatur der Zellen zu messen. Die Nennspannung des Systems beträgt dabei 323 Volt, die maximale elektrische Leistung 120 kW. Das Lithium-Ionen-Batteriesystem besitzt einen Gesamtenergieinhalt von 36 kWh bei einem Gesamtgewicht von 345 kg. Laut dem Fahrzyklus NEDC kann dadurch eine elektrische Reichweite von etwa 300 km erreicht werden. [10]

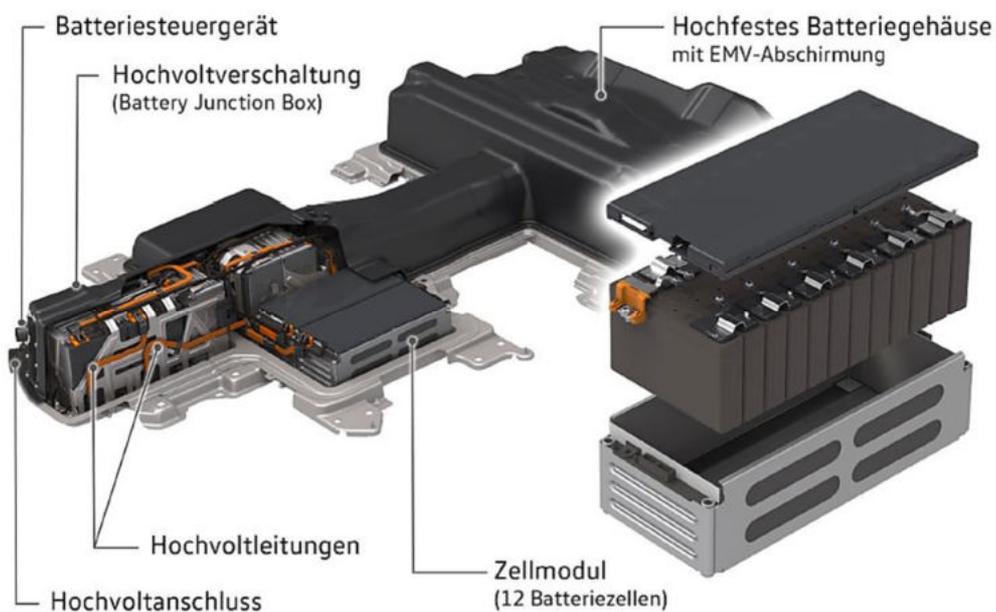


Abbildung 1-10: Das Hochvoltbatteriesystem des VW e-Golfs [10]

Als Vergleich zur Conversion-Design-Plattform ist in Abbildung 1-11 die Purpose-Design-Plattform des modularen Elektrifizierungs-Baukasten (MEB) von Volkswagen dargestellt, welcher die Basis für verschiedene Fahrzeugmodelle bildet. Das Hochvoltbatteriesystem ist platzsparend zwischen den beiden Achsen im Unterboden des Fahrzeugs untergebracht. Durch die Skalierbarkeit des Batteriesystems sowie der Möglichkeit verschiedene Zelltypen zu integrieren, kann die Batterie für unterschiedliche Kapazitäten, Leistungen und Fahrzeugmodelle verwendet werden. [10]

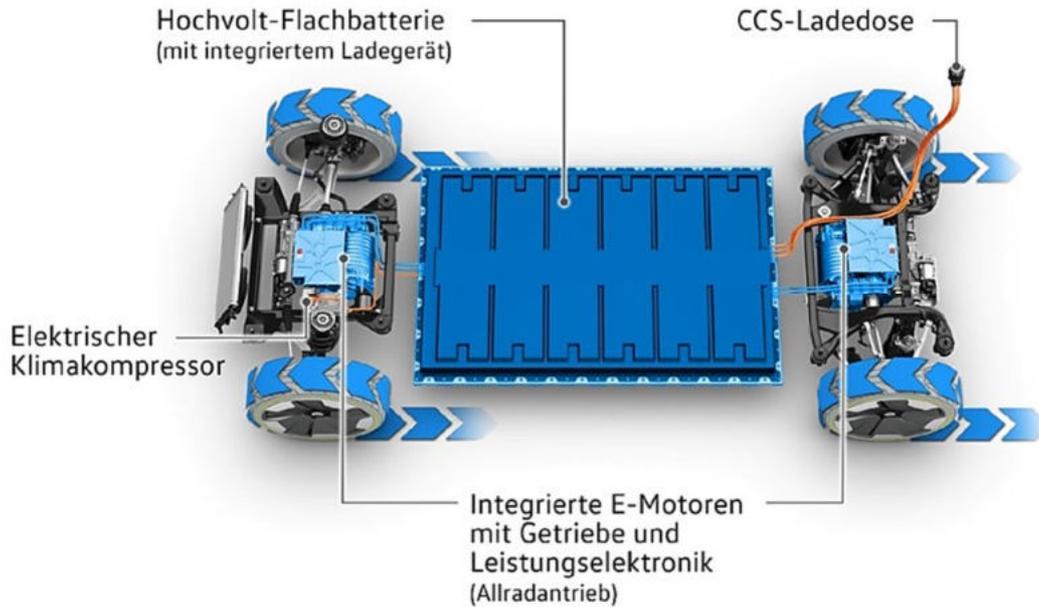


Abbildung 1-11: MEB-Plattform von Volkswagen als Purpose Design [10]

In Abhängigkeit der Batteriegröße können somit unterschiedliche Reichweiten erreicht werden. Die eingesetzte Hochvoltbatterie basiert wiederum auf der Lithium-Ionen-Technologie, da diese aktuell die höchste Energiedichte aller Systeme bietet und somit höhere Reichweiten als andere Energiespeicher ermöglichen. Der Aufbau der Hochvoltbatterie setzt sich wiederum aus verschalteten einzelnen Modulen, welche aus einzelnen Batteriezellen bestehen, zusammen. [10]

Um die Hochvoltbatterie zu schützen und immer im bestmöglichen Temperaturbereich zu betreiben, ist diese mit einer integrierten Flüssigkeitskühlung ausgestattet. Ein Zellmodulcontroller überwacht dabei Ströme, Spannung und Temperatur von ausgewählten Modulen des Systems. Die CCS-Ladesteckdose, die sich im Heck des Fahrzeugs befindet, kann zum Laden des Batteriesystems mit Wechselstrom oder zum Direktladen mit Gleichstrom verwendet werden. Zum Laden der Hochvoltbatterie mit Wechselstrom, ist ein Ladegerät integriert, welches den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt. [10]

Diese modulare Plattform bietet die Möglichkeit zwei Achsantriebseinheiten einzusetzen. Als Hauptantrieb dient der elektrische Achsantrieb an der Hinterachse. Je nach Fahrzeugtyp kann auch die Vorderachse elektrifiziert werden, um dadurch Allradfunktion- und hohe Leistungen umzusetzen. Alle Nebenaggregate, wie Thermomanagementkomponenten, Ladegerät, Steuergeräte sowie Komponenten des Lenk- und Bremssystems sind im vorderen Bereich des Fahrzeugs integriert. [10]

In Abbildung 1-12 ist der Aufbau des Hauptantriebs an der Hinterachse dargestellt. Als Antriebsmaschine dient eine dreiphasige permanenterrregte Synchronmaschine, welche sich durch ihre hohe Leistungsdichte, hohe Wirkungsgrade sowie über eine gute Leistungskonstanz über einen weiten Drehzahlbereich auszeichnet. Die E-Maschine erreicht eine maximale Leistung von 150 kW, ein maximales Drehmoment von 310 Nm und eine maximale Drehzahl von 16.000 U/min. [11]

Die Wicklungen der E-Maschine und der Anschluss für die dreiphasigen Stromschienen sind im Stator enthalten. Im Rotor sind die Permanentmagneten enthalten, welche zur Drehmomenterzeugung notwendig sind. Der Stator und der Rotor sind in einem Gussgehäuse untergebracht, in welchem auch Kühlkanäle zur Flüssigkeitskühlung enthalten sind. [11]

Die Lagerungen der Rotorwelle befinden sich im linken Lagerschild sowie im Zwischengehäuse, welche über den gesamten Umfang des E-Maschinengehäuses axial miteinander verschraubt sind. Das linke Lagerschild wird mit einem Lagerschilddeckel verschlossen, sodass der Resolver ohne hohen Demontageaufwand zugänglich ist. Zur Übersetzung der Drehzahl vom Elektromotor für den Antrieb der Räder wird ein Ein-Ganggetriebe mit Differenzial eingesetzt. Mithilfe von einem zweistufigen Stirnradgetriebe mit Zwischenwelle wird die Gesamtübersetzung erreicht. Die Übersetzung kann je nach Fahrzeugmodell verändert werden. Eine Einmal-Ölfüllung versorgt alle Getriebekomponenten mithilfe von Umlenkkomponenten mit Schmieröl. Eine mechanische Parksperrung kommt hier nicht zum Einsatz. Im Stillstand wird die Antriebsachse mittels einer elektronisch aktivierten Parkbremse gesperrt. Das Gesamtgewicht der elektrischen Achsantriebseinheit beträgt 90 kg. [11]

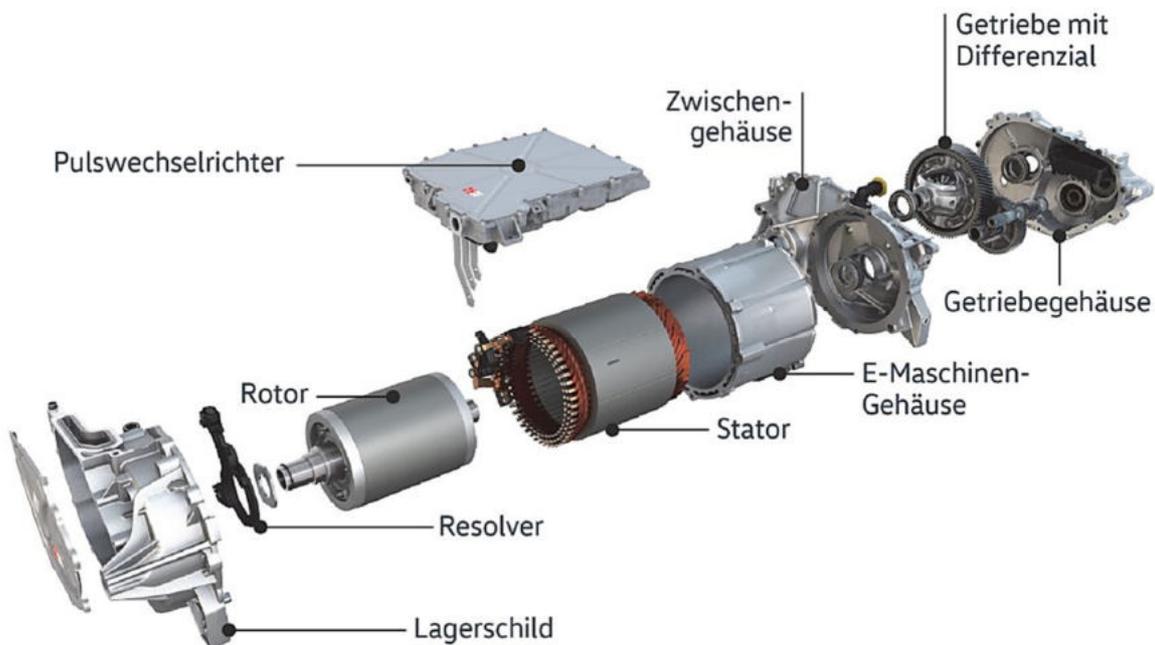


Abbildung 1-12: Aufbau Hinterachsantrieb der MEB-Plattform von Volkswagen [11]

Die Antriebseinheit ist zusammen mit dem Wechselrichter und einem zweistufigen Ein-Ganggetriebe in achsparalleler Anordnung ausgeführt. Der dreiphasige Wechselstrom mit variabler Frequenz und Amplitude wird von einem flüssigkeitsgekühlten Pulswechselrichter (Inverter, Umrichter) erzeugt, der direkt an die E-Maschine angeschlossen ist. Dabei regelt dieser über die Phasenströme das Drehmoment und über die Frequenz die Drehzahl des Elektromotors. Im Rekuperationsmodus wird der erzeugte Wechselstrom zum Laden der Hochvoltbatterie in Gleichstrom umgewandelt. Zum Betrieb der E-Maschine ist die Erfassung der Rotorstellung erforderlich. Die Temperatur der Kupferwicklungen im Stator ist in die Regelung mit einbezogen. Um diese Messgrößen zu erfassen, wird ein Resolver und ein Temperatursensor eingesetzt. [11]

Zur Versorgung des Bordnetzes ist ein Gleichrichter erforderlich. Dieser ist allerdings in der MEB-Plattform nicht im Inverter (Wechselrichter) integriert, sondern als eigene Komponente realisiert. [11]

In Abbildung 1-13 ist die ausgeführte Fahrzeugarchitektur vom VW ID.4 basierend auf dem modularen Elektrifizierungs-Baukasten (MEB) dargestellt.

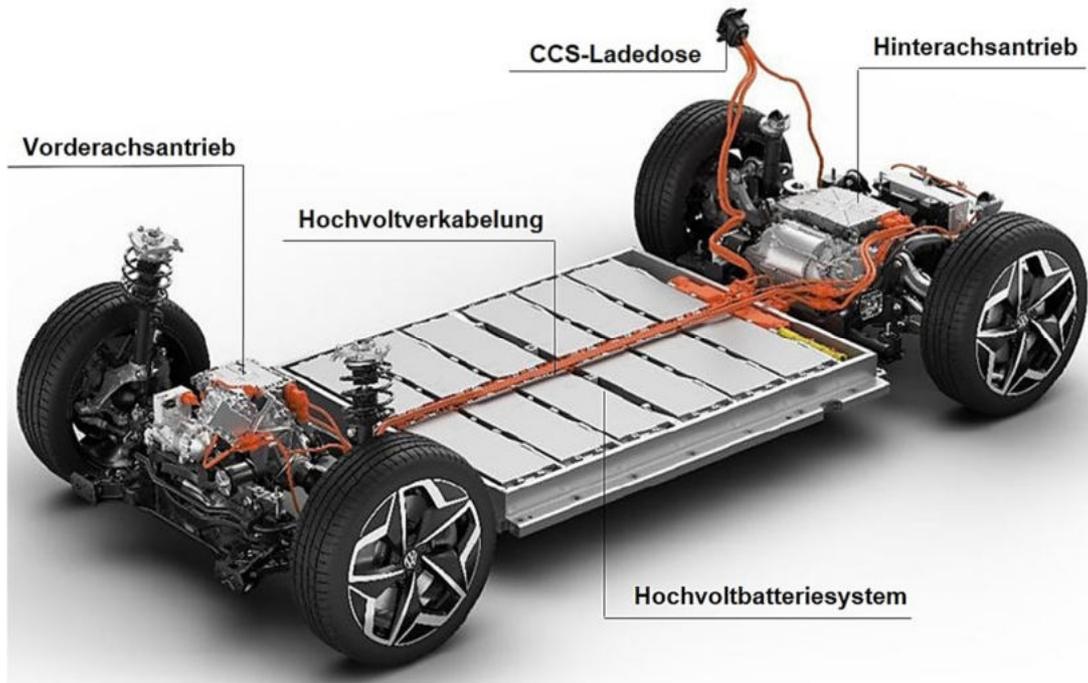


Abbildung 1-13: Fahrzeugarchitektur vom VW ID.4 [12]

Es ist ersichtlich, dass hier eine Allradantriebstopologie umgesetzt wird. Zusätzlich zum bereits zuvor beschriebenen Hauptantrieb an der Hinterachse ist dieses batterieelektrische Fahrzeug mit einer elektrischen Vorderachse ausgestattet. Dies ermöglicht neben der Allradfunktion eine verbesserte Beschleunigung des Fahrzeugs. Als Antriebsmaschine an der Vorderachse wird eine dreiphasige Asynchronmaschine eingesetzt. Dieser Maschinentyp zeichnet sich durch seine kurzzeitige Überlastfähigkeit aus, sowie durch geringe Verluste, wenn der Elektromotor nicht aktiv betrieben wird.

Im Vergleich zur achsparallelen Anordnung des Antriebs an der Hinterachse ist an der Vorderachse die E-Maschine koaxial zum Abtrieb des Getriebes angeordnet. Ein weiterer Unterschied zum Hinterachs Antrieb besteht im Kühlkonzept des elektrischen Frontantriebs. Anwendung findet hier eine Kühlmittel- sowie eine separate Ölkühlung. Die Asynchronmaschine ist mit einem eigenen Kühlmantel zwischen Stator und Maschinengehäuse ausgestattet. Nachdem das flüssige Kühlmittel (Wasser-Glykol) durch den Inverter fließt, tritt es in den Kühlmantel des Maschinengehäuses ein. Um die Asynchronmaschine höher belasten zu können, benötigen die elektromagnetisch wirkenden Komponenten der E-Maschine ein zusätzliches Kühlkonzept. Diese Kühlung wird durch den direkten Kontakt mit dem Öl erreicht, welches auch zur Schmierung der Lager und der Verzahnungen eingesetzt wird. Für den Ölkreislauf ist allerdings eine Ölpumpe erforderlich, die über die Zwischenwelle des Getriebes angetrieben wird. Neben der Schmierfunktion übernimmt die Ölfüllung auch die Kühlfunktion des Rotors der elektrischen Maschine. Das Öl wird dabei von der mechanisch angetriebenen Ölpumpe angesaugt und durch einen Öl-Kühlmittel-Wärmetauscher gepumpt, der einen Teil der Wärme vom Öl an die Kühlflüssigkeit überträgt. Dieser Wärmetauscher ist in ein eigenes Gussgehäuse mit verschlossenem Deckel integriert und befindet sich zwischen der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik. Durch diese kombinierte Kühlmittel- und Ölkühlung ist es möglich, die Betriebsgrenzen der Antriebsmaschine deutlich zu erweitern. Die maximal erreichbare Leistung der elektrischen Achsantriebseinheit an der Vorderachse liegt bei 75 kW. Das maximale Drehmoment liegt bei 160 Nm. Die gesamte Achse erreicht dabei ein Gesamtgewicht von 60 kg. [12]

Der Radnabenantrieb bietet aufgrund seiner Kompaktheit eine praktische Option für die Integration in modulare Fahrzeugarchitekturen für Elektro- und Hybridfahrzeuge. Er gestattet eine Flexibilität hinsichtlich der angetriebenen Räder. So können Front-, Heck- oder Allradantrieb problemlos realisiert werden. Der Einsatz einer derartigen Antriebstechnologie mit Radnabenmotor ermöglicht eine Neugestaltung der Fahrzeugarchitektur. Es ergeben sich dadurch vollkommen neue Gestaltungsmöglichkeiten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugarchitekturen, da herkömmliche Antriebskomponenten wegfallen. Durch die ständige Drehmomentkontrolle in den Rädern mit schnellen Reaktionszeiten für eine bedarfsgerechte Drehmomentverteilung und Traktionskontrolle entstehen fahrdynamische Vorteile. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt sind hohe mögliche Lenkwinkel der angetriebenen Räder. Dadurch, dass keine Antriebswellen zwischen Getriebeausgang und Räder eingesetzt werden müssen, erreicht das Gesamtfahrzeug eine größere Manövrierfähigkeit als ein konventionelles Fahrzeug. [13]

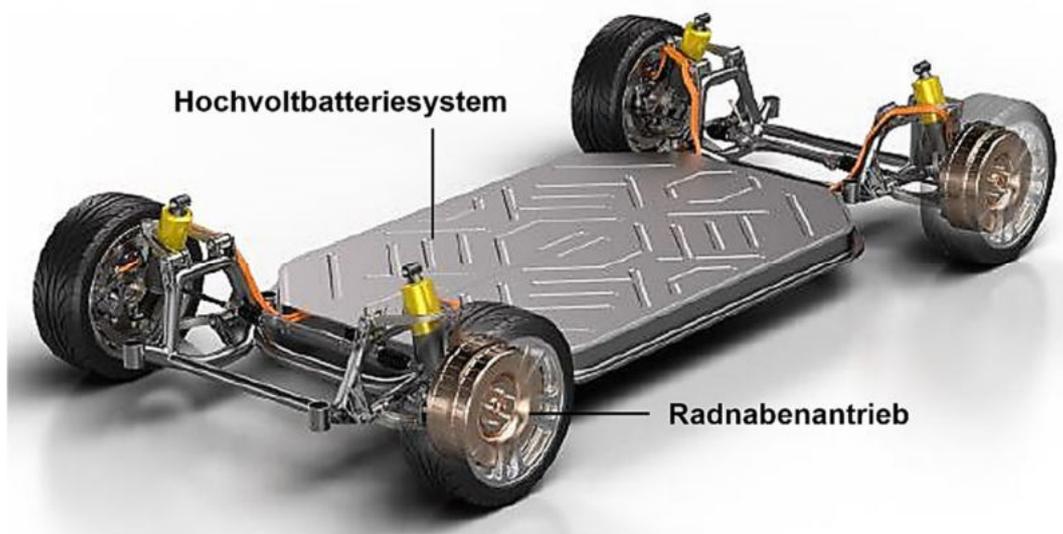


Abbildung 1-14: Fahrzeugarchitektur mit vier Radnabenmotoren [13]

Die Achsmodule für vorne und hinten können weitgehend gleich ausgeführt werden. In Abbildung 1-14 ist eine beispielhafte Fahrzeugarchitektur mit vier Radnabenantriebseinheiten dargestellt. Das Batteriesystem ist dabei im Unterboden des Fahrzeugs angeordnet. Durch Skalierbarkeit der Antriebseinheiten kann die Leistung der Fahrzeuge variiert werden. Dadurch, dass hier kein Getriebe eingesetzt wird, ist die Erzeugung eines ausreichenden Drehmoments auf engem Bauraum ein sehr wichtiger Faktor in Bezug auf die Konstruktionsausführung der elektrischen Maschine. Die Ausführung mit Außenrotor ist in diesem Fall zu favorisieren. Dies ist aufgrund der niedrigen Motordrehzahl praktischer und maximiert den Radius des Luftspalts, was wiederum zu einem höheren Drehmoment und Wirkungsgrad führt. [13]

1.2 Brennstoffzellen-Elektrische-Antriebe

Es sei angemerkt, dass aus heutiger Sicht mittelfristig keine nennenswerten Stückzahlen von Brennstoffzellen-Elektro-Pkw auf den Markt kommen werden und diese Antriebstechnologie daher mittelfristig für Kfz-Werkstätten nur in Ausnahmefällen relevant ist.

Ein Brennstoffzellen-Elektrisch betriebenes Fahrzeug ist ein Elektrofahrzeug mit stark verkleinerter Batterie, wobei die elektrische Energie mithilfe von Wasserstoff OnBoard erstellt wird. Zur direkten Energieumwandlung der chemisch gebundenen Energie in elektrische Energie wird ein

Brennstoffzellensystem eingesetzt. Der dafür benötigte Wasserstoff wird im gasförmigen oder flüssigen Zustand in Tanks mitgeführt. Durch die kontrollierte elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff entsteht Wasser, elektrische Energie sowie thermische Energie, siehe elektrochemische Reaktionsgleichung: [33]



Die thermische Energie kann zu Heizzwecken verwendet werden oder muss als Verlustwärme abgeführt werden.

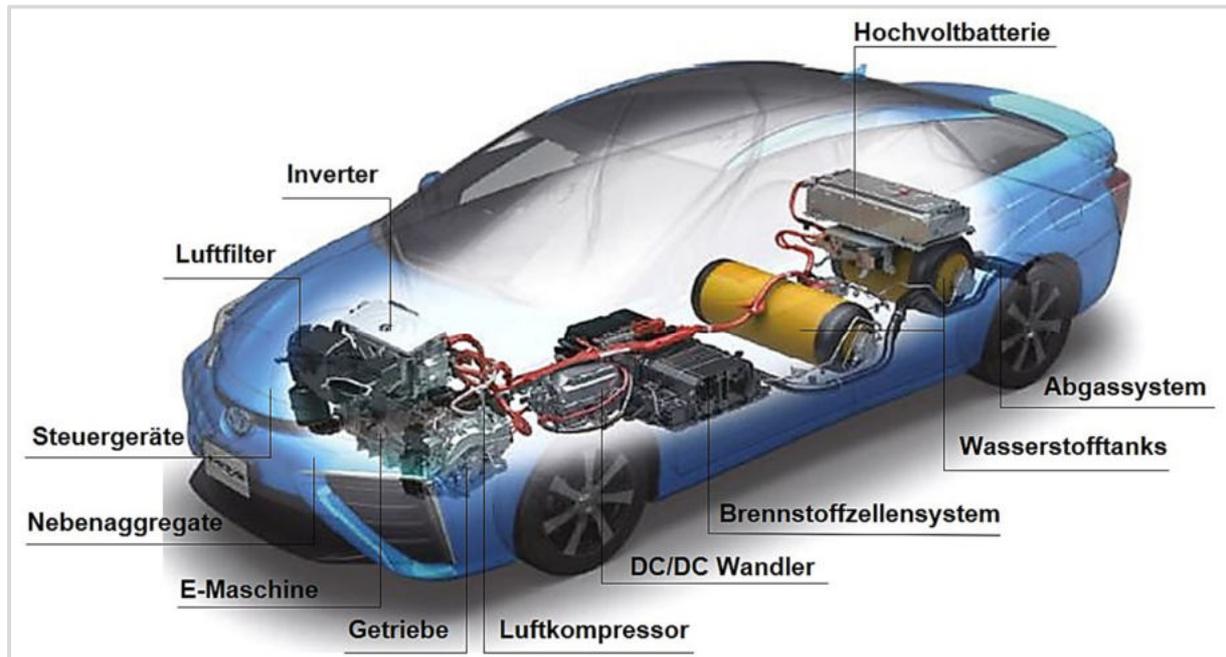


Abbildung 1-15: Hauptkomponenten von einem Brennstoffzellenfahrzeug– Beispielfahrzeug Toyota Mirai I [33]

Übersicht Komponenten und Systemfunktionen

Eine Übersicht der Hauptkomponenten eines Brennstoffzellen-Elektrisch betriebenen Fahrzeugs ist in Abbildung 1-15 ersichtlich. Das Brennstoffzellensystem ist in diesem Ausführungsbeispiel im Unterboden des Fahrzeugs angeordnet. Alternativ kann dieses auch im Motorraum untergebracht werden, was im PKW-Bereich dem Stand der Technik entspricht. Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt typischerweise in Druckbehältern im hochverdichteten Zustand bei bis zu 700 bar. Normalerweise sind zwei bis drei zylindrische Druckbehälter im Heckbereich des Fahrzeugs untergebracht. Die Speicherfähigkeit je Tank beträgt dabei 2-3 kg verdichteten Wasserstoff. Bei einem Pkw beträgt die Reichweite pro kg Wasserstoff ca. 100 km, mit Abweichungen je nach Fahrzeug und Einsatzbedingungen. Im Inneren besteht ein Druckbehälter aus einem Plastikliner, welcher mit Kohlefasern umwickelt ist. Die Gesamtwandstärke eines Tanks beträgt in etwa 30-40mm. Der Druck sowie die Temperatur im Behälter werden dabei messtechnisch überwacht. [33]

Im Brennstoffzellenfahrzeug sind mehrere Spannungswandler erforderlich. Diese sorgen für die Umwandlung der unterschiedlichen Spannungsniveaus des Gleichstroms von Brennstoffzellen-Stack, Hochvoltbatterie und Niederspannungsbordnetz. Die Aufgabe des Inverters oder Umrichter, besteht darin in Antriebsphasen den Gleichstrom des Brennstoffzellen- und Batteriesystems in Wechselstrom für die Traktionsmaschinen umzuwandeln. In Verzögerungsphasen hingegen wird der Umrichter dafür verwendet, um den generatorisch erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, sodass

dieser in das Batteriesystem eingespeist werden kann. Zur Versorgung des Niederspannungsbordnetz kommt wie beim batterieelektrischen Fahrzeug eine 12-Volt Batterie zum Einsatz, um alle Nebenaggregate mit elektrischer Leistung zu versorgen. [33]

Um alle Funktionen der Systeme mit ihren Komponenten in Abhängigkeit von Fahrerwünschen und den Betriebsbedingungen koordinieren zu können, ist ein elektronisches Antriebsstrangmanagement erforderlich. Dies erfordert eine Betriebsstrategie, um einen möglichst geringen Energieverbrauch sowie die Einhaltung der Vorgaben des Fahrers zu erreichen. Dazu werden verschiedene Steuergeräte eingesetzt, die über mehrere Bussysteme miteinander kommunizieren. Die erzeugte elektrische Energie wird demnach neben dem Fahrantrieb auch für sämtliche Nebenaggregate des Brennstoffzellensystems sowie im Fahrzeug verwendet. Zur Verteilung des Stroms an die einzelnen Verbraucher wird eine Hochvolt-Verteilereinheit eingesetzt.

Die Betankung erfolgt an einer Wasserstoff-Tankstelle. Die Betankungsdauer ist dabei mit einem konventionellen Tankvorgang vergleichbar, wodurch eine kurze Tankdauer erreicht wird. Während dem Füllvorgang erfolgt eine aktive Kommunikation mit der Zapfsäule, da dieser Prozess aus thermodynamischer Sicht einen komplexen Vorgang darstellt. Im Verlauf der Befüllung resultiert ein starker Temperaturanstieg des Wasserstofftanks, welcher limitiert werden muss. Demzufolge erfolgt an der Zapfsäule eine Vorkühlung des Wasserstoffs. Im Vergleich zu einem batterieelektrischen Fahrzeug können höhere Reichweiten bei vergleichbarem Fahrzeuggesamtgewicht erreicht werden. [14]

Der Antrieb eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs erfolgt ausschließlich über eine oder mehrere Elektromaschinen, welche in Achsantriebseinheiten integriert sind. Der Fahrleistungsgrundbedarf wird dabei vollständig mit dem Brennstoffzellensystem gedeckt. Die Leistungsspitzen werden durch die Batterie abgedeckt. Des Weiteren besteht, wie schon beim batterieelektrischen Fahrzeug die Möglichkeit, die kinetische Energie beim Bremsvorgang zu rekuperieren. Die Geräuschentwicklung eines solchen Fahrzeugs kann sehr gut mit der eines batterieelektrischen Fahrzeugs verglichen werden. Grundsätzlich gilt, dass Brennstoffzellen-Elektrische Fahrzeuge bei niedriger Last gute Wirkungsgrade aufweisen, dieser sich aber bei steigender Last verschlechtert. Für Antriebe mit Brennstoffzellensystem bedeutet das, dass vor allem im Stadt- oder bei stationärem Betrieb ein Wirkungsgradvorteil gegenüber konventionellem Antrieb mit Verbrennungsmotor erzielt werden kann. Um die Lastspitzen abzudecken, wird eine Lithium-Ionen-Batterie verwendet, welche den Strom aus der Brennstoffzelle puffert und an den E-Antrieb weiterleitet. Die Batterie dient des Weiteren auch zum Rückspeichern der Rekuperationsenergie. [14]

In Abbildung 1-16 ist ein ausgeführtes Brennstoffzellen-Gesamtsystem als Motorraum-Variante dargestellt. Das abgebildete Aggregat hat etwa die Größe eines Verbrennungsmotors für einen typischen Pkw. Ein Brennstoffzellensystem setzt sich normalerweise aus insgesamt vier Teilsystemen zusammen: [33]

1.) Brennstoffzellen-Stack

Das Kernelement der Brennstoffzelle bildet der Brennstoffzellen-Stack. Dieser vollzieht die elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zur Erzeugung der elektrischen Energie und Wärme.

2.) Das Luftversorgungssystem

welches sich unter dem Stack befindet, reguliert die erforderliche Luftmenge zur Sauerstoffversorgung sowie den Luftdruck für den Stack. Zur Reinigung der ansaugenden Luft von Partikeln wird ein Luftfilter eingesetzt. Der Luftkompressor ist erforderlich, um Luft aus der Umgebung anzusaugen und anschließend zu komprimieren, wodurch eine erhöhte elektrische Leistungsabgabe erreicht werden kann. Dieser Vorgang ist ähnlich wie bei einem Kompressor oder Turbolader eines Verbrennungsmotors. Der Kompressor erwärmt die Luft, welche im Anschluss durch einen Wärmetauscher gekühlt wird, sodass die gewünschte Betriebstemperatur der Brennstoffzelle erreicht wird. Um ein Austrocknen der Brennstoffzelle zu verhindern, wird zur Regelung der Feuchte der zugeführten Luft ein Befeuchter eingesetzt. Dieser kann entweder als externe Komponente ausgeführt sein oder es wird zur Befeuchtung der Luft eine Teilmenge des anfallenden und vorgewärmten Produktwassers verwendet. [33]

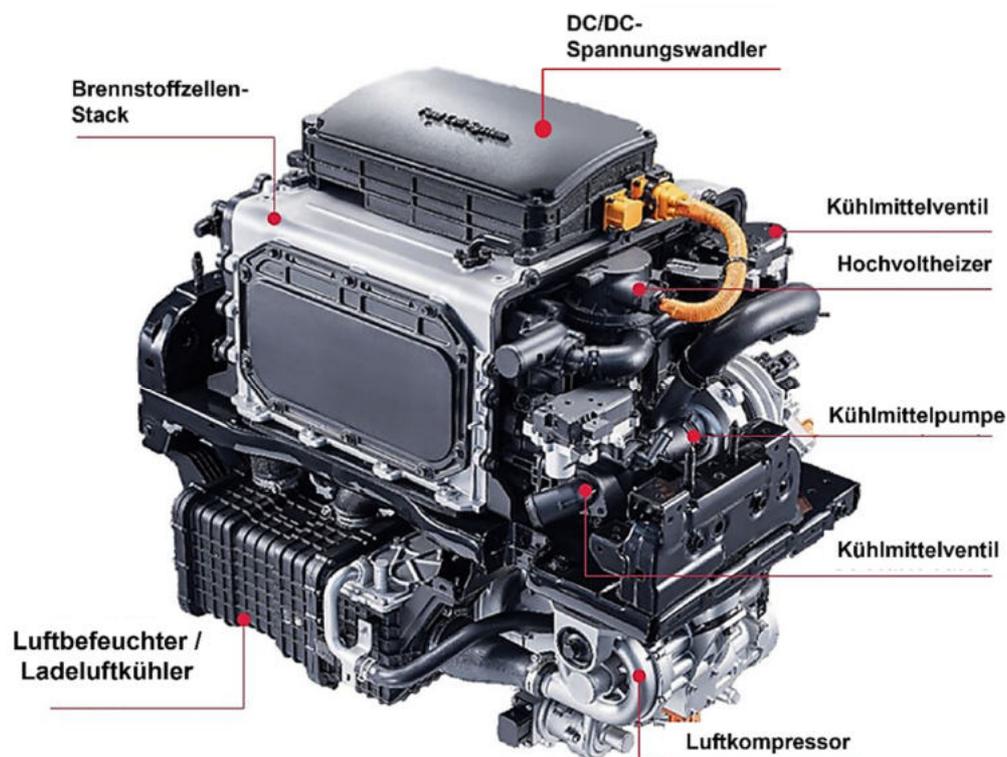


Abbildung 1-16: Brennstoffzellensystem – Beispielsystem vom Hyundai Nexa [34]

3.) Das Wasserstoffversorgungssystem

befördert den Wasserstoff aus den Druckbehältern mit den erforderliche Betriebsbedingungen in den Brennstoffzellen-Stack. Die dafür erforderlichen Komponenten befinden sich an der Rückseite des Brennstoffzellensystems, siehe Abbildung 1-16. Um die Druckunterschiede zwischen Luft- und Wasserstoffpfad möglichst gering zu halten, kommt ein Niederdruckventil zum Einsatz, welches den Wasserstoffdruck von 700 auf etwa 10-15 bar reduziert, um Beschädigungen an den Membran des Stacks zu vermeiden. Bei diesem Expansionsvorgang kühlt allerdings der bei Umgebungstemperatur gespeicherte Wasserstoff ab. Zur Anpassung der Temperatur des gasförmigen Wasserstoffs an die gewünschte Betriebstemperatur des Brennstoffzellen-Stacks wird nach dem Niederdruckventil ein Wärmetauscher eingesetzt. [33]

Durch die elektrochemische Reaktion entsteht als Nebenprodukt reines Wasser, welches über ein Abblaseventil in gasförmiger Form ins Abgassystem emittiert wird, wovon der Großteil an die Umgebung abgegeben wird. Um eine Wasserstoff-Unterversorgung zu vermeiden, wird üblicherweise mehr Wasserstoff zugeführt, als durch die elektrochemische Reaktion benötigt wird. Daher wird ein Kompressor eingesetzt, sodass der überschüssige Wasserstoff rezykliert und wieder eingespeist werden kann. [33]

4.) Thermomanagementsystem

Des Weiteren sind funktionale Komponenten für das Thermomanagementsystem erforderlich, welche an der rechten Seite des Brennstoffzellensystems angeordnet sind, siehe Abbildung 1-16. Der optimale Temperaturbereich einer typischen Brennstoffzelle für den Pkw-Bereich beträgt zwischen 60 und 85°C. Die Aufgabe des Thermomanagementsystems ist es, die maximal zulässige Betriebstemperatur der Komponenten zu überwachen und folglich den jeweils optimalen Temperaturbereich zu regulieren. Zur Beförderung des Kühlmittels wird eine Kühlmittelpumpe eingesetzt. Das Kühlmittel muss eine möglichst geringe elektrische Leitfähigkeit aufweisen, da die Kühlkanäle direkt in stromführende Elemente integriert sind. Zur idealen Aufteilung des Wärmestroms in einen kleinen und großen Kühlkreislauf kommt ein 3-Wegeventil zum Einsatz. [33]

1.2.1 Antriebsarchitekturen für Brennstoffzellenfahrzeuge

Aufgrund der zwei unterschiedlichen Energiespeicher stellen Brennstoffzellenfahrzeuge Elektro-Wasserstoff-Hybride dar. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Ausführungen des Antriebsstrangs hinsichtlich der Energiebereitstellung zu unterscheiden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass für die Einfachheit von Abbildung 1-17 und Abbildung 1-18 alle Spannungswandler zu einem Funktionsblock-Wandler zusammengefasst sind.

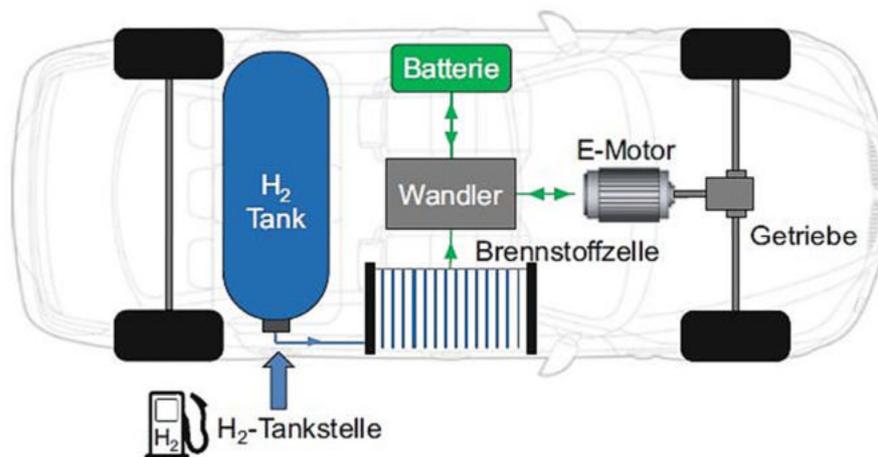


Abbildung 1-17: Antriebsstrang mit dominanten Brennstoffzellenantrieb [33]

Bei der ersten Antriebsstrangarchitektur wird der Fahrleistungsbedarf vollständig mit dem Brennstoffzellensystem gedeckt, siehe Abbildung 1-17. Diese Ausführung wird als dominanter Brennstoffzellenantrieb bezeichnet. Das Batteriesystem wird ausschließlich zur Rückgewinnung von Bremsenergie in Verzögerungsphasen und zur Leistungsunterstützung beim Beschleunigungsvorgang verwendet. Die Brennstoffzelle ist daher sehr leistungsstark mit 100 bis 150 kW ausgeführt. Die

mitgeführte Batterie ist üblicherweise mit hoher Leistungsdichte und geringer Kapazität von 1 bis 2 kWh realisiert. Zur Erzielung von hohen Reichweiten bis zu 600 km wird der Wasserstofftank als Hochdrucktank ausgeführt und ermöglicht die Speicherung von 5 bis 6 kg verdichteten Wasserstoff. Das einzige Abgas, das beim Betrieb von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in die Umwelt abgegeben wird, ist Wasserdampf. [33]

Die zweite Ausführung ist in Abbildung 1-18 ersichtlich und beschreibt die Variante mit Range-Extender Brennstoffzellenantrieb. Im Unterschied zum dominanten Brennstoffzellenantrieb wird hier der Fahrleistungsbedarf vorwiegend mit dem mitgeführten Batteriesystem abgedeckt. Die Brennstoffzelle wird eingesetzt, um die Reichweite des Fahrzeugs zu verlängern. Das hier mitgeführte Batteriesystem ist üblicherweise mit geringer Leistungsdichte und hoher Kapazität ausgeführt. Des Weiteren wird die Brennstoffzelle mit einer geringeren Leistung von 20 bis 30 kW realisiert und ein Wasserstoffdrucktank mit kleinem Volumen eingesetzt. Bei diesem Range-Extender Antriebssystem erfolgt neben der Wasserstoffbetankung die wesentliche Energieversorgung der Batterie durch das Laden über das Stromnetz. [33]

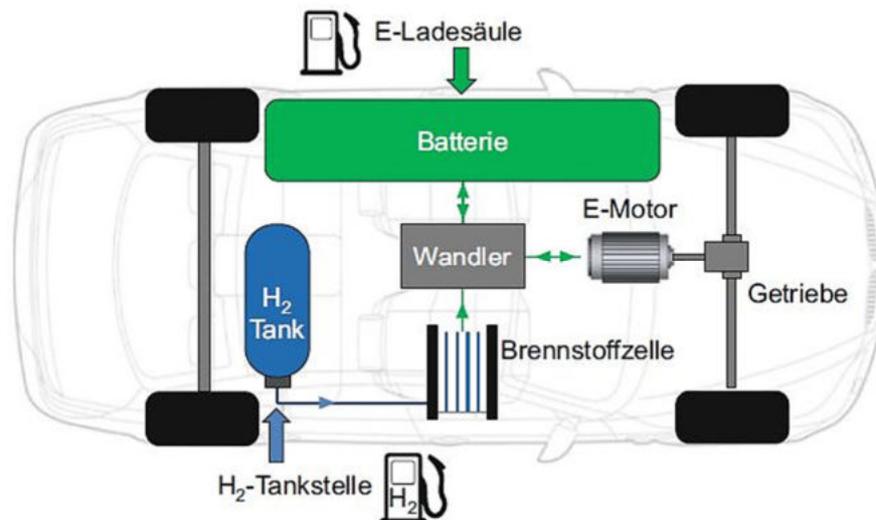


Abbildung 1-18: Antriebsstrang mit Range-Extender Brennstoffzellenantrieb [33]

Zusätzlich zu den beiden beschriebenen Antriebssystemen mit Brennstoffzelle sind auch Mischformen der beiden Varianten möglich.

1.2.2 Fahrzeugarchitekturen

Die Fahrzeugarchitektur von einem Brennstoffzellen-Elektrischen Fahrzeug bezieht sich auf die räumliche Anordnung aller Komponenten im Fahrzeug. Neben der Anwendung im PKW-Bereich finden Fahrzeuge mit Brennstoffzellentechnologie auch in anderen Fahrzeugsegmenten Verwendung. Es bestehen u.a. bereits ausgeführte Fahrzeuge und Konzepte für Gabelstapler, Kleinbusse, Busse, Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge sowie Traktoren.

In Abbildung 1-19 ist die Fahrzeugarchitektur eines Personenkraftwagens mit dominantem Brennstoffzellenantrieb dargestellt.

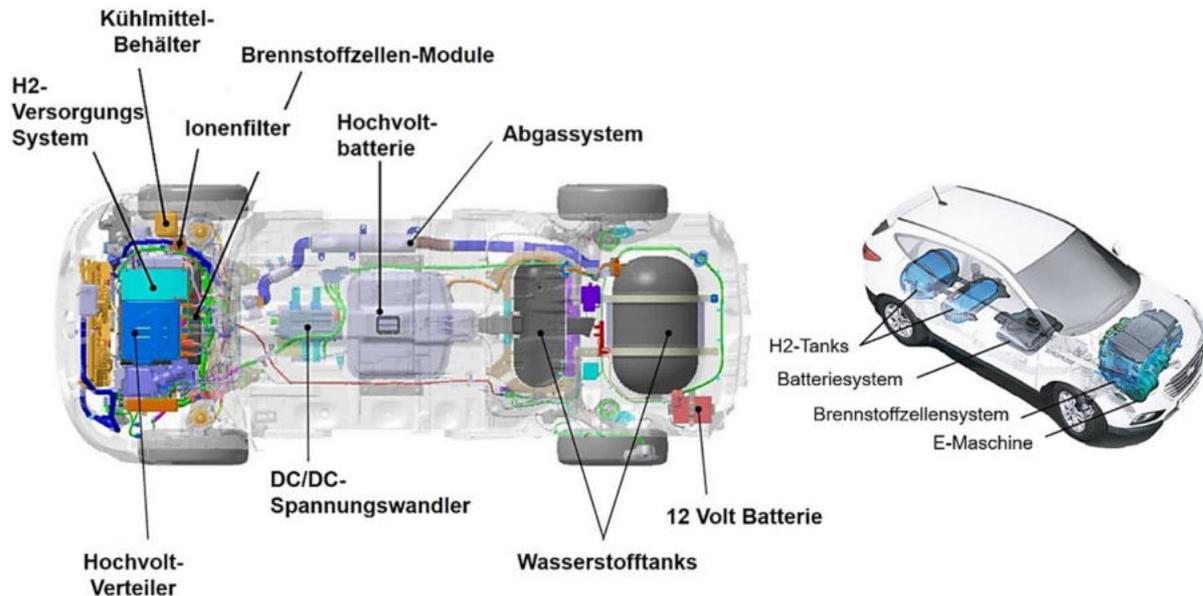


Abbildung 1-19: Fahrzeugarchitektur mit dominanten Brennstoffzellenantrieb – Hyundai ix35 FCEV [33] [35]

Das komplette Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von 100 kW ist dabei im Motorraum untergebracht. Das Tanksystem speichert dabei 5-6 kg Wasserstoff. Um den zur Verfügung stehenden Bauraum für die Wasserstoff-Speicherung bestmöglich zu nutzen, werden typischerweise mehrere zylindrische Druckbehälter verwendet. Diese sind in diesem Ausführungsbeispiel quer zur Fahrtrichtung angeordnet und befinden sich im hinteren Fahrzeugbereich. Ein solcher Tank erfüllt alle Anforderungen der Automobilindustrie in Bezug auf die betriebliche Sicherheit sowie Crash. [33] [35]

Als zusätzlichen Energiespeicher ist in der Mitte im Unterboden des Fahrzeugs ein Batteriesystem mit geringer Kapazität von 0,95 kWh angeordnet. Dieses findet Anwendung zur Leistungsunterstützung beim Beschleunigen sowie zur Rekuperation beim Bremsen. Um die Brennstoffzelle vor Schadgasen und Partikeln zu schützen, wird die angesaugte Luft durch einen Ionenfilter geleitet. Über das Abgassystem wird einzig feuchte Luft in Form von Wasserdampf emittiert. [33] [35]

Die Elektromaschine mit Getriebe zum Antrieb der Räder befindet sich an der Vorderachse unterhalb des Brennstoffzellensystems. Ein komplettes System mit Brennstoffzelle und elektrischem Achsantrieb kann bei gleicher Leistungsklasse etwa mit der Baugröße einer Verbrennungskraftmaschine mit Getriebe und den erforderlichen Nebenaggregaten verglichen werden. [33] [35]

Als weiteres Realisierungsbeispiel ist in Abbildung 1-20 ein Brennstoffzellen Plug-In Hybridfahrzeug dargestellt. Das bedeutet, dass die Batterie extern über das Stromnetz geladen werden kann. Auch hier kommt ein dominanter Brennstoffzellenantrieb zum Einsatz, welcher den Hauptfahrleistungsbedarf durch den mitgeführten Wasserstoff deckt. Allerdings ist mithilfe der Lithium-Ionen-Batterie (13,8 kWh) im Heckbereich das rein batterieelektrische Fahren möglich. Die Systemleistung, welche sich aus Brennstoffzellen- und Batterieleistung zusammensetzt, beträgt bei diesem Fahrzeug 147 kW. [36]

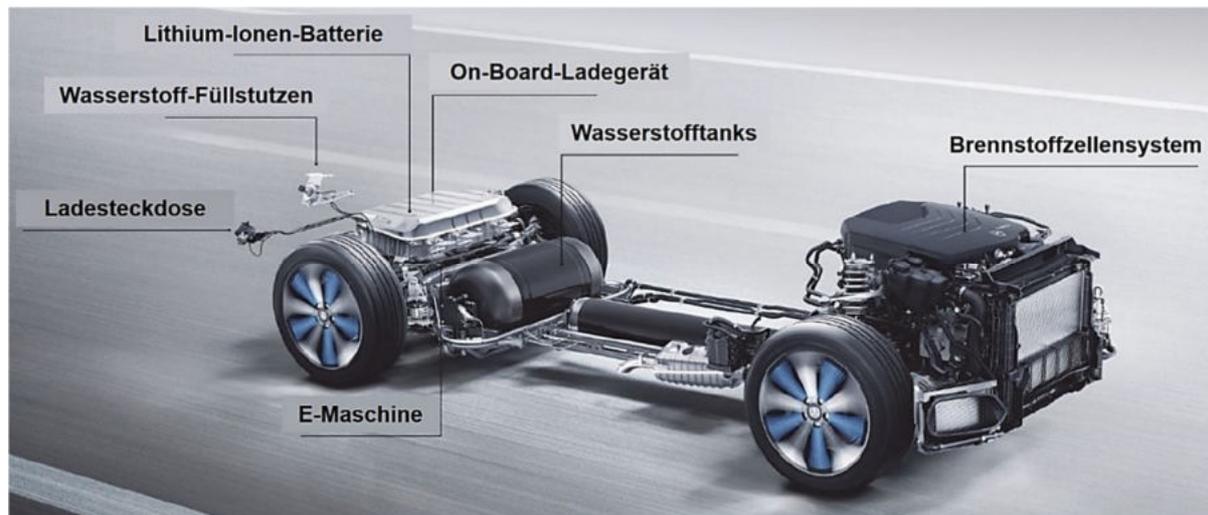


Abbildung 1-20: Antriebstrang von einem Brennstoffzellen Plug-In-Hybridfahrzeug – Mercedes GLC F-Cell [36]

Dadurch, dass Bauraum im Fahrzeugtunnel zur Verfügung steht, wird in diesem ein Druckbehälter integriert. Ein zweiter Drucktank ist unter der Rücksitzbank angeordnet. Der elektrische Antriebsmotor ist zusammen mit dem Wechselrichter und dem Getriebe in die Hinterachse integriert. Ein Gleichrichter sorgt dafür, dass die Spannung des Brennstoffzellensystems an die Batteriesystemspannung angepasst wird. Der Wechselrichter sowie andere Hochvoltkomponenten werden auf dem Spannungsniveau des Batteriesystems betrieben. Dadurch wird eine einfache Nutzung von anderen Komponenten elektrifizierter Fahrzeuge ermöglicht.

Eine intelligente Betriebsstrategie in Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation optimiert kontinuierlich die Nutzung beider Energiequellen. [36]

1. Im Hybrid-Modus bezieht das Fahrzeug Strom aus beiden Energiespeichern. Während das Brennstoffzellensystem im optimalen Wirkungsgradbereich arbeitet, werden Leistungsspitzen vom Batteriesystem abgefangen.
2. Im Brennstoffzellenmodus wird der Ladezustand der Batterie durch die Energie aus der Brennstoffzelle konstant gehalten. Dieser Modus ist ideal, wenn eine bestimmte batterieelektrische Reichweite für kommende Fahrsituationen abgedeckt werden muss.
3. Für Kurzstrecken bietet sich das rein batterieelektrische Fahren ohne Brennstoffzelle sehr gut an.
4. Im Lade-Modus hat das Aufladen der Hochvoltbatterie Priorität und wird verwendet, um die Batterie für die maximale Reichweite aufzuladen. Es werden somit Leistungsreserven geschaffen, um Steigungs- oder sehr dynamische Fahrten zu erleichtern. Das System verfügt in allen Betriebsbereichen über die Funktion, Energie zurückzugewinnen. Diese Rückgewinnung erfolgt während des Bremsvorgangs sowie beim Ausrollen des Fahrzeugs und wird im Batteriesystem gespeichert.

Die Antriebstechnologie mit einer Brennstoffzelle könnte speziell bei einem stationären Betrieb und für Nutzfahrzeuge sowie Busse eine nennenswerte Alternative für eine klimafreundlichere Mobilität darstellen. Bei Brennstoffzellen-Elektrisch betriebenen Bussen ist der funktionelle Aufbau des Antriebstrangs grundsätzlich ähnlich wie bei einem PKW. Die räumliche Integration der jeweiligen Teilsysteme und Komponenten im Fahrzeug sieht jedoch anders aus. Abbildung 1-21 zeigt den Fahrzeugaufbau mit der Anordnung aller Systeme und Komponenten von einem Brennstoffzellen-Elektrischen-Bus.

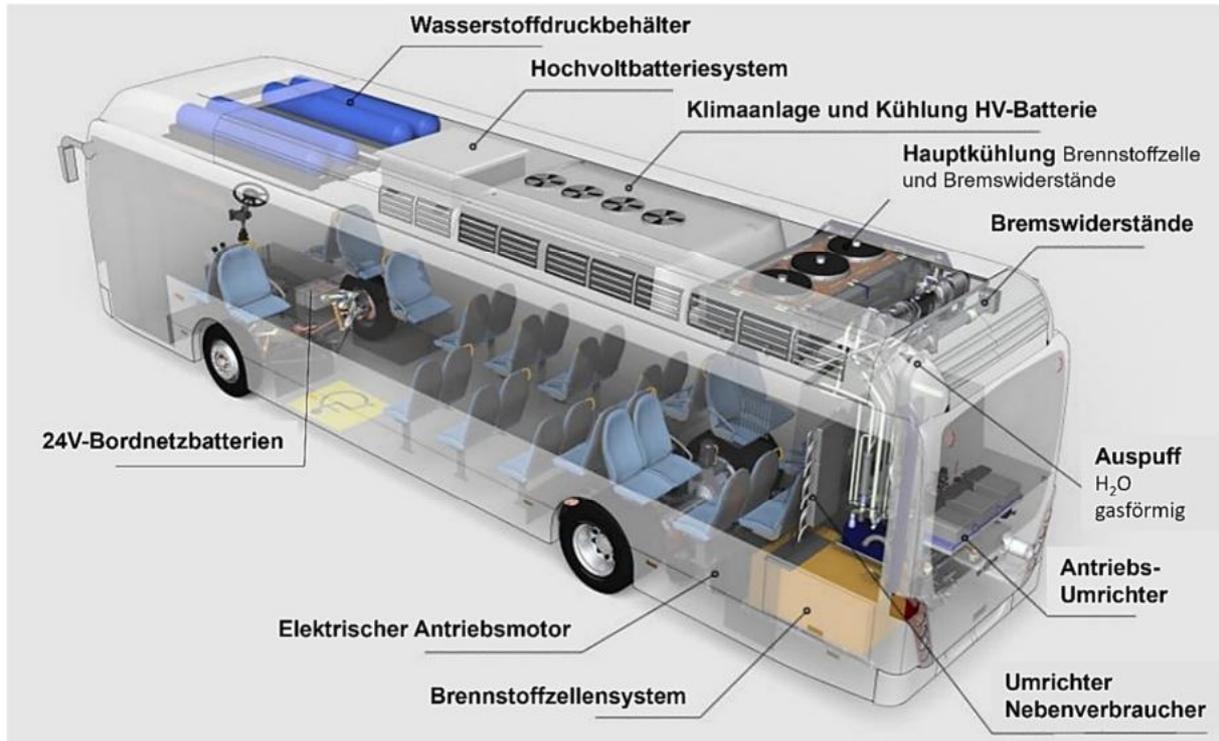


Abbildung 1-21: Fahrzeugaufbau Brennstoffzellenbus - Van Hool A330 Fuel Cell Hybrid [37]

Zusätzlich zu den von PKW bekannten Teilsystemen werden hier beispielsweise Bremswiderstände eingesetzt. Diese stellen im Generatorbetrieb der elektrischen Maschine einen Widerstand dar, welche den Motor belastet und so abbremst. Diese Widerstände werden verwendet, um die elektrische Bremsleistung, die von der HV-Batterie nicht aufgenommen werden kann, in Abwärme umzuwandeln. Um diese Wärme abzuführen, müssen die Bremswiderstände gekühlt werden. [37]

Die hier eingesetzten Brennstoffzellensysteme werden für längere Lebensdauern entwickelt, sodass bereits Lebensdauern von über 10.000 Stunden nachgewiesen werden konnten. Die Speicherfähigkeit der Druckbehälter beträgt hier 40 kg Wasserstoff. Der Energieverbrauch liegt etwa bei 9 kg Wasserstoff auf 100 km. Dadurch können bereits Reichweiten von 300 bis 400 km erreicht werden. Das bedeutet, dass Brennstoffzellenbusse eine ähnliche Flexibilität wie Dieselsebusse aufweisen. Des Weiteren bieten diese, bezogen auf Tank-to-Wheel, eine fast doppelt so hohe Effizienz und keine Emissionen in städtischen Gebieten. [37]

1.3 Hybrid-Elektrische-Antriebe

Ein Fahrzeug mit Hybridantrieb verwendet mindestens zwei verschiedene Energiewandler und zwei verschiedene Energiespeichersysteme zum Antrieb der Räder. Dabei können mechanische und elektrische Energiewandler zur Erzeugung des Drehmoments für den Fahrantrieb eingesetzt werden. Das Mitführen chemisch gebundener Energie erfolgt durch ausgewählte Kraftstoffe, wie beispielsweise Diesel, Benzin oder Gas. Des Weiteren kann die Energie in Form von mechanischer- und elektrischer Energie sowie aus Kombinationen dieser Energieformen mitgeführt werden. Die Umwandlung der

gespeicherten Energie in eine andere Energieform ermöglicht theoretisch eine große Anzahl an Varianten von Hybridarchitekturen. Im Folgenden werden nur Systeme betrachtet, die auf chemisch und elektrisch gespeicherter Energie und deren direkte Umwandlung in mechanische Antriebsenergie basieren. [7]

Ziel der Hybridisierung ist es, einerseits den Verbrauch und die Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmaschinen zu reduzieren und andererseits den Fahrspaß und den Komfort zu erhöhen. Bei Betrachtung der Antriebskombination mit Verbrennungs- und Elektromotor lassen sich bereits erste Vorteile ableiten, die für dieses Zusammenspiel sprechen. Aspekte wie beispielsweise, sehr hohe Energiedichte des Kraftstoffs, kostengünstiges und leichtes Tanksystem sowie weitgehend vorhandene Tankinfrastruktur sprechen für den Einsatz der Verbrennungskraftmaschine. Die Verwendung der elektrischen Maschine ermöglicht neben dem Motorbetrieb für den Antrieb auch den Generatorbetrieb für die Nutzung der Bremsenergie. Darüber hinaus bietet der Elektromotor ein sehr hohes Drehmoment im Stillstand sowie bei niedriger Drehzahl, sodass dieser zur Unterstützung bei Beschleunigungsphasen eingesetzt werden kann. Zudem lässt sich die E-Maschine sehr flexibel steuern und ermöglicht eine einfache dezentrale Anordnung im Antriebsstrang, da hier Kupferkabeln anstelle einer mechanischen oder hydraulischen Verbindung verwendet werden. [7]

Üblicherweise werden Hybridelektrische-Fahrzeuge nach zwei Hauptkriterien charakterisiert. Einerseits werden die Fahrzeuge nach ihrem Elektrifizierungsgrad unterteilt und andererseits erfolgt die Einteilung nach der mechanisch-elektrischen Antriebsarchitektur. Diese bezieht sich auf den Energiefluss und Anordnung der Antriebskomponenten. Des Weiteren kann unterschieden werden, welche Betriebszustände mit einem Hybridantrieb realisierbar sind. Folgende Funktionen lassen sich mit einem Hybrid-Elektrischen-Antriebssystem umsetzen: [7] [16]

- reines Fahren mit Verbrennungskraftmaschine
- rein elektrisches Fahren mit E-Motor
- hybrides Fahren (Kombination aus beiden Energiequellen)
- Start-Stopp – Funktion (Anlassen der VKM nach Stillstand)
- Boost-Funktion (kurzeitige Leistungsunterstützung)
- Rekuperation (Rückgewinnung von Bremsenergie)
- Lastpunktverschiebung (Betriebspunktoptimierung der VKM)
- Segeln (Abkoppeln der VKM vom Antriebsstrang – mit und ohne Unterstützung der E-Maschine)
- Generatorbetrieb E-Maschine (elektrische Energieerzeugung)

Die einzelnen Betriebszustände und Funktionsweisen des Fahrzeugs sind an Fahrzustände und definierte Bedingungen gekoppelt. Diese werden mittels einer Betriebsstrategie festgelegt, welche von vielen Eingangsgrößen abhängt. Die Betriebsstrategie dient der Verteilung von Drehmoment und Leistung zwischen dem Verbrennungsmotor und den elektrischen Maschinen. Dazu wird der Fahrerwunsch mit systeminternen und gelernten Daten kombiniert. In Abhängigkeit von diesen Eingangsgrößen werden die jeweiligen Betriebszustände durch die Betriebsstrategie bestimmt und die entsprechenden Befehle an die Steuergeräte der Komponenten übermittelt. Es wird damit die Richtung und Größe des elektrischen Leistungsflusses zum Antrieb oder zur Batterie festgelegt. Außerdem werden dadurch die zu wählenden Übersetzungen mit den entsprechenden Übergängen und Schaltungen definiert. [7] [16]

Die Betriebsstrategie hat somit einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die Emissionen von Hybrid-Elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Ausgehend von der Betriebsstrategie ist ein elektronisches Antriebsstrangmanagement erforderlich, das alle Funktionen der Antriebsstrangkomponenten in Abhängigkeit vom Fahrerwunsch, der Fahrsituation, dem Status des Antriebsstrangsystems sowie den jeweiligen Betriebsbedingungen koordiniert. [7] [14] [15] [16]

1.3.1 Funktionen und Strategien hybrider Antriebsstränge

Die Start-Stopp-Funktion wird zum Anlassen des abgestellten Verbrennungsmotors verwendet. In Fahrzuständen, in denen keine Antriebsleistung benötigt wird, stellt der momentane Kraftstoffverbrauch einen Verlust dar. Dieser kann durch Abschalten der Verbrennungskraftmaschine vermieden werden kann. Um die Systemfunktionen des Fahrzeugs bei abgestelltem Motor aufrecht zu erhalten, müssen die dafür erforderlichen Komponenten elektrifiziert werden (z.B. Klimaanlage oder Hydraulikpumpen). Weiters muss der sichere Start des Motors garantiert werden. Die zu diesem Zweck benötigte elektrische Energie wird aus dem mitgeführten Energiespeicher entnommen, welcher in anderen Fahrsituationen wieder aufgefüllt wird. Die Start-Stopp-Funktion stellt im eigentlichen Sinne noch keine Hybridfunktion dar, aber sie ist der erste Schritt in Richtung Elektrifizierung des Antriebsstrangs. [7] [16]

Rekuperation bezeichnet die Rückgewinnung der kinetischen Energie des Fahrzeugs, welche in Verzögerungsphasen in elektrische Energie umgewandelt wird. In konventionellen Antriebssystemen bleibt diese kinetische Energie ungenutzt und wird mittels Reibungsbremsen in Wärme umgewandelt. Um die zurückgewonnene Energie speichern zu können, ist ein dafür geeigneter Energiespeicher erforderlich. Zur Umwandlung der kinetischen Energieform wird eine im Generatormodus betriebene Elektromaschine eingesetzt. Allerdings kann nur ein Teil der Energie zurückgewonnen werden, da bei jeder Energieumwandlung Verluste auftreten. Des Weiteren stellen die begrenzte Leistungsaufnahmefähigkeit vom Energiespeicher sowie die Leistung des Generators zusätzliche Einschränkungen bei der Umwandlung dar. Im Falle einer Überschreitung der elektrisch nutzbaren Bremsleistung wird zusätzlich die Reibungsbremse des Fahrzeugs zur Bremsung verwendet. Der Bremsvorgang ist somit ein Zusammenwirken von Reibungsbremse und elektrischer Rekuperation. Die Auslegung der Reibungsbremse ist abhängig vom Rekuperationspotential sowie vom Batteriemanagementsystem. Des Weiteren ändert sich das Verschleißverhalten der Reibungsbremse, wodurch andere Materialien zum Einsatz kommen können. [7] [16]

Die Boost-Funktion unterstützt den Verbrennungsmotor mit einer elektrischen Maschine. Hauptanwendung findet diese Funktion zur Leistungsunterstützung beim Beschleunigungsvorgang. Durch Verwendung von rekuperierter Energie für das Boosten kann zum einen der Kraftstoffverbrauch gesenkt und zum anderen der Fahrspaß erhöht werden. Des Weiteren kann damit die Leistung sowie das Beschleunigungsverhalten der VKM verringert werden. So können beispielsweise einfachere und kostengünstigere Abgasturbolader zum Einsatz kommen. Außerdem kann diese Funktion, während eines mechanischen Schaltvorgang mit Zugkraftunterbrechung eingesetzt werden, um Beschleunigungslücken zu reduzieren. [7] [16]

Das rein elektrische Fahren beschreibt den Antrieb des Fahrzeugs ausschließlich mit mitgeführter elektrischer Energie. In Abhängigkeit von der Batterieauslegung können dadurch unterschiedliche rein elektrische Reichweiten bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor erreicht werden.

Durch eine Lastpunktverschiebung im verbrennungsmotorischen Betrieb kann eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs erreicht werden. Typischerweise liegt der verbrauchsgünstigste Bereich einer Verbrennungskraftmaschine in der Nähe der Vollastlinie. Deshalb macht es Sinn, den Verbrennungsmotor bei einer Leistung nahe diesem Betriebsbereich an der Vollastlinie zu betreiben. Grundsätzlich werden die möglichen Betriebspunkte und Drehzahlen der VKM von der Getriebeübersetzung vorgegeben. Abbildung 1-22 (a) zeigt dieses Prinzip einer Lastpunktverschiebung anhand eines allgemeinen Verbrauchskennfeld eines Ottomotors. [7] [16]

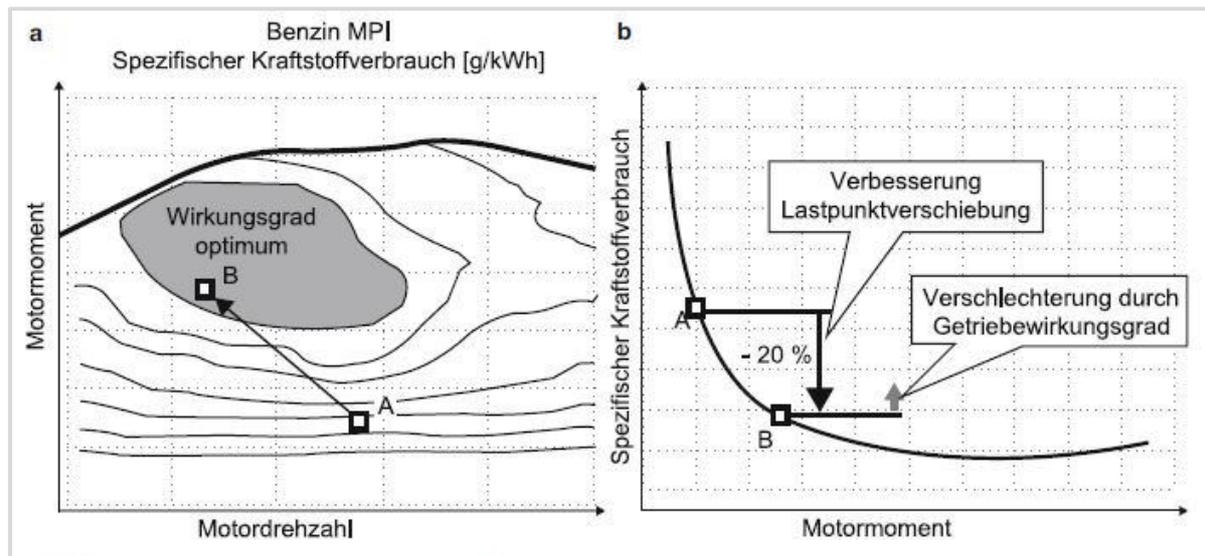


Abbildung 1-22: Prinzip der Lastpunktverschiebung (a) und Auswirkung auf die Effizienz (b) [16]

Dabei sind die spezifischen Kraftstoffverbrauchslinien als sogenannte Muschelkurven dargestellt. Diese Muschelkurven charakterisieren dabei Bereiche mit konstantem spezifischem Kraftstoffverbrauch. Nahe der Vollastlinie ist der wirkungsgradoptimale Bereich in der Farbe Grau hinterlegt. Um ausgehend von einem verbrauchsgünstigen Betriebspunkt A zu einem wirkungsgradgünstigeren Betriebspunkt B zu gelangen, muss der Verbrennungsmotor bei gleicher Leistung mit höherem Drehmoment (auch Last genannt) und geringerer Drehzahl betrieben werden. Je nach Getriebeausführung kann allerdings nicht immer das volle Potential einer Lastpunktverschiebung genutzt werden. Durch eine effizienzoptimale Schaltlogik kann immer der energieeffizienteste Gang verwendet werden. Diese Auswirkung auf die Effizienz ist ebenso in Abbildung 1-22 (b) ersichtlich. Durch Einsatz der Elektromaschine kann, ausgehend vom Punkt B das Motormoment reduziert oder erhöht werden, um die VKM noch weiter an ihren wirkungsgradoptimalen Bereich heranzuführen. [16]

Um diese Betriebspunktoptimierung in hybriden Antriebssträngen umzusetzen, wird die elektrische Maschine sowohl als Antriebsmotor als auch als Generator genutzt. Um Rückschaltungen für ein erhöhtes Beschleunigungspotential zu vermeiden, wird durch elektrisches Boosten im verbrauchsgünstigeren höheren Gang der Beschleunigungswunsch des Fahrers erfüllt. [7] [16]

Durch Generatorbetrieb der elektrischen Maschine kann der Verbrennungsmotor mit erhöhter Motorlast und geringerer Drehzahl in einem effizienten Bereich mit günstigerem Wirkungsgrad arbeiten. Der Hauptanteil dieser Last wird zum mechanischen Fahrtrieb verwendet. Der restliche Anteil dieser Last wird zur Ladung der Batterie eingesetzt, um anschließend je nach Fahrsituation z.B. Boosten oder rein elektrisch fahren zu können. [7] [16]

1.3.2 Klassifizierung nach Hybridarchitekturen

In Hinblick auf die Anordnung und Kombination der mechanischen und der elektrischen Komponenten im Antriebsstrang sowie des Energieflusses können Hybridantriebe wie folgt eingeteilt werden: [7]

- Paralleler-Hybridantrieb
- Serieller-Hybridantrieb
- Leistungsverzweigter- oder kombinierter Hybridantrieb

In Abbildung 1-23 sind diese Antriebsarchitekturen von Hybridfahrzeugen in schematischer Form dargestellt. Ein achsgeteilter Hybrid ist eine spezielle Ausführungsform eines parallelen Hybrids. Bei allen hier gezeigten Architekturen kann optional ein Anschluss für externes ausgeführt werden. Ein Fahrzeug mit einem solchen Anschluss wird als Plug-In-Hybrid bezeichnet.

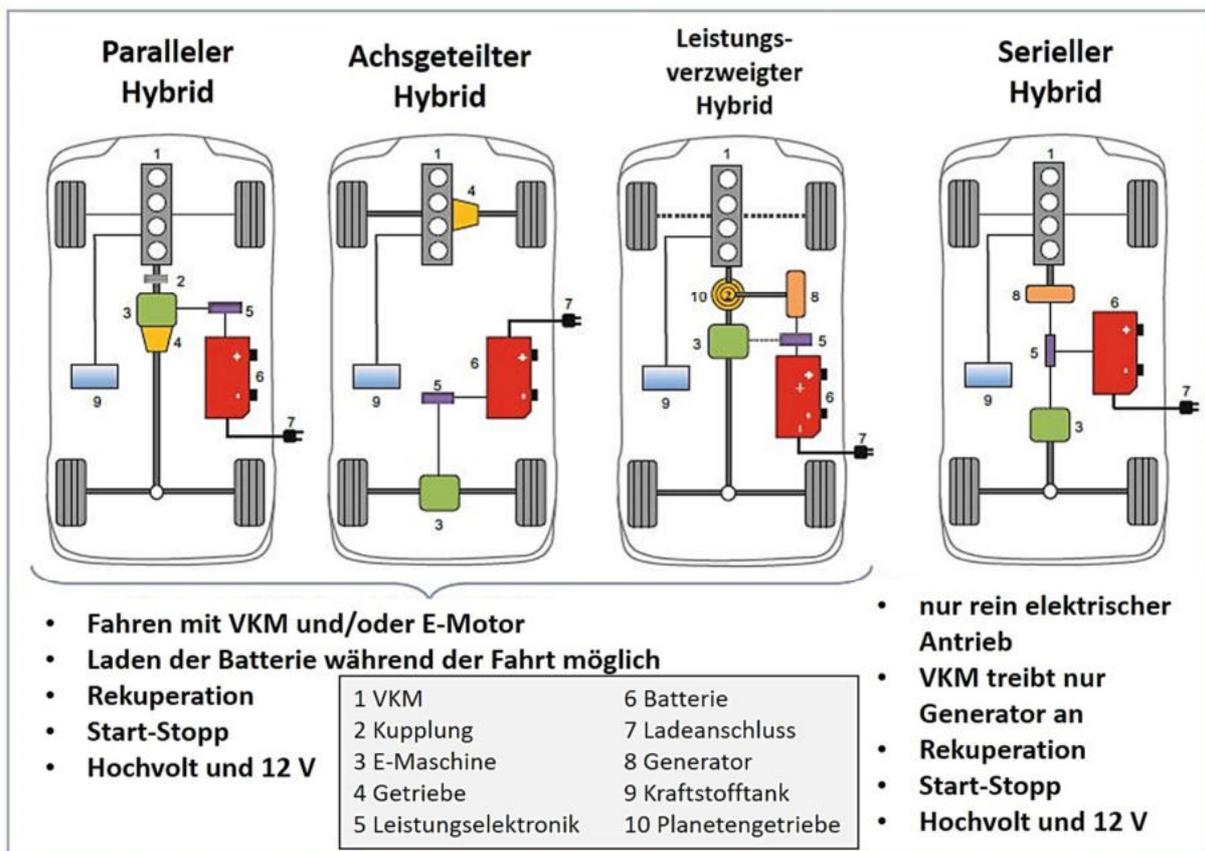


Abbildung 1-23: Basisantriebsarchitekturen in Bezug auf den Leistungsfluss von Hybridfahrzeugen [15]

1.3.2.1 Serieller Hybridantrieb

- **Aufbau**

Der serielle Hybridantrieb basiert auf der seriellen Anordnung des Energieflusses, also der hintereinander Anordnung, der Energiewandler Verbrennungsmotor und E-Maschine. Ein serieller Hybrid besitzt zwei E-Maschinen. Eine E-Maschine wirkt als Generator und ist mit der Verbrennungskraftmaschine mechanisch gekoppelt. Der Generator erzeugt die elektrische Energie und speichert diese in die Batterie ein. Der Antrieb der Räder erfolgt über eine weitere elektrische Maschine, welche ihre Energie aus der Batterie bezieht. Die zweite E-Maschine kann sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb betrieben werden. Dies ermöglicht in Verzögerungsphasen

Bremsenergie zu rekuperieren und in die Traktionsbatterie einzuspeichern. Der Verbrennungsmotor ist mechanisch vollständig entkoppelt von der Antriebsachse und kann somit im verbrauchsoptimalen Bereich betrieben werden. Die Batterie dient dabei als Energiepuffer. Die vom Verbrennungsmotor mit Generator erzeugte Energie wird sowohl für den direkten elektrischen Fahrantrieb als auch zum Nachladen des mitgeführten Batteriesystems verwendet. Unabhängig vom Fahrzustand kann die VKM mit Generator auch zum Laden der Batterie während der Fahrt sowie bei stehendem Fahrzeug eingesetzt werden. [7] [15] [16]

- **Vor- und Nachteile**

Der serielle Hybrid hat den Vorteil, dass in der Regel kleinere Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können. Diese werden typischerweise mit konstanter niedriger Drehzahl betrieben, sodass ein geringer Kraftstoffverbrauch erreicht werden kann. Der Hauptvorteil, wird durch den wirkungsgradoptimalen Betrieb der Verbrennungskraftmaschine erreicht, aber durch die Energieumwandlungsverlusten etwas reduziert. Als Nachteil kann die mehrmalige Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie genannt werden. Die Entkopplung des Motorgeräusches vom Fahrzustand kann subjektiv unangenehm empfunden werden. [7] [15] [16]

- **Einsatzgebiete**

Bisher konnten sich serielle Hybridantriebssysteme im PKW-Bereich nicht durchsetzen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen werden diese jedoch gerne bei Hybridbussen in städtischen Gebieten eingesetzt. Ein Plug-in-Ladeanschluss in Kombination mit einer erhöhten Batteriekapazität ermöglicht es, den Verbrennungsmotor weiter zu verkleinern, sodass dieser nur noch zur Erhöhung der Reichweite genutzt wird. Ein solches serielles Plug-In Hybridfahrzeug mit kleiner VKM wird als Range-Extender elektrisches Fahrzeug bezeichnet. [7] [15] [16]

1.3.2.2 Paralleler Hybridantrieb

- **Aufbau**

Der parallele Hybridantrieb ist dadurch gekennzeichnet, dass eine direkte mechanische Verbindung vom Verbrennungsmotor bis zu den Antriebsrädern besteht. Der Energiefluss der elektrischen Maschine erfolgt parallel zum mechanischen Energiefluss der VKM und kann je nach Bedarf zu- oder abgeschaltet werden. Im Gegenzug zum seriellen Antrieb ist nur eine elektrische Maschine erforderlich, welche wahlweise im Motor- oder im Generatorbetrieb betrieben wird. Der mechanische- und der elektrische Zweig der Drehmomenterzeugung kann somit parallel auf die Räder wirken. Durch die Integration von einem Freilauf oder einer Kupplung können die beiden Antriebssysteme voneinander entkoppelt werden, sodass je nach Bedarf auch rein elektrisch oder rein konventionell mit VKM gefahren werden kann. [7] [15] [16]

Ein paralleler Hybridantrieb kann in Abhängigkeit der Anordnung der E-Maschine in mehrere unterschiedliche Bauformen unterteilt werden. Abbildung 1-24 zeigt mögliche und auch ausgeführte Positionierungsmöglichkeiten der elektrischen Maschine. Der Buchstabe „P“ steht dabei für Parallel und die Ziffer charakterisiert die Position der E-Maschine. [7] [15] [16]

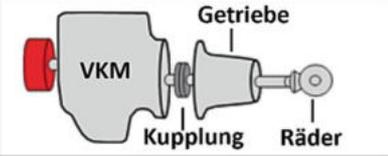
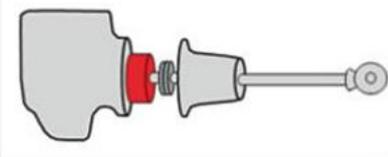
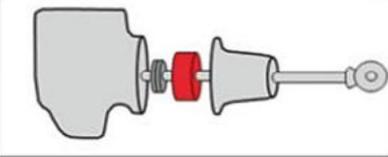
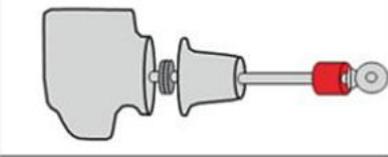
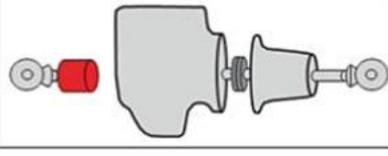
P0		E-Motor mittels Riementrieb mit Verbrennungsmotor verbunden
P1		E-Motor drehfest mit Verbrennungsmotor verbunden
P2		E-Motor am Getriebeeingang durch Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt
P3		E-Motor nach Getriebe angeordnet
P4		E-Motor zum Antrieb einer eigenen Achse, welche nicht vom VKM angetrieben ist (Achsgeteilter Hybrid)

Abbildung 1-24: Definitionen für Parallel-Hybridantriebssysteme zur Positionierung der E-Maschine [7]

Je nach Einbindung der elektrischen Maschine ins System können unterschiedliche Funktionen in umgesetzt werden. Allerdings ergeben sich dadurch wiederum spezifische Vor- und Nachteile. So kann beispielsweise mit einer P1-Konfiguration das rein elektrische Fahren umgesetzt werden, allerdings muss dabei das Schleppmoment des inaktiven Verbrennungsmotors aufgebracht werden und macht daher wenig Sinn. Durch Integration der E-Maschine nach der Anfahrkupplung kann dies vermieden werden, weil der VKM entkoppelt werden kann. Eine solche Anordnung wird als P2-Konfiguration bezeichnet und ist eine sehr häufig ausgeführte Antriebsarchitektur bei parallelen Hybridantrieben, siehe Abbildung 1-23.

Beim parallelen Hybrid werden die Leistungen der beiden Antriebsmotoren addiert. Um dies zu realisieren, sind zusätzlich zu den Antriebseinheiten ein oder mehrere Getriebe, Freiläufe oder Kupplungen erforderlich. Die Überlagerung der Ausgangsleistungen vom Verbrennungsmotor und E-Maschine erfolgt mechanisch durch Drehmoment-, Drehzahl- oder Zugkraftaddition. [7] [15] [16]

- Bei der Drehmomentaddition werden die beiden Antriebe zum Beispiel direkt mit einem Stirnradgetriebe oder einer Kette gekoppelt. Das Verhältnis der Drehmomente von beiden Energiewandlern kann dadurch frei verändert werden. Die Drehzahlen hingegen stehen dabei in einem festen Verhältnis zueinander.
- Bei einem Hybrid mit Drehzahladdition werden die Ausgangsleistungen der beiden Antriebsmotoren mit einem Planetengetriebe kombiniert. Durch die Übersetzung des Getriebes ist hier das Verhältnis der Drehmomente festgelegt und die Drehzahlen der Energiewandler können frei bestimmt werden.
- Die Zugkraftaddition erfolgt bei einem achsgeteilten P4-Hybridantrieb. Hier werden die Zugkräfte vom VKM und E-Maschine über die Traktion auf der Fahrbahn zusammengeführt.

- **Vor- und Nachteile**

Dadurch, dass bei einem parallelen Hybridfahrzeug nur mehr eine elektrische Maschine benötigt wird, welche entweder als Traktionsmotor oder auch als Generator arbeiten kann, kann die Dimensionierung der Antriebskomponenten besser gestaltet werden. Beispielsweise kann sich die Auslegung des Verbrennungsmotors an der Höchstgeschwindigkeit und die der elektrischen Maschine am Stadtbetrieb ausrichten. Außerdem bietet der direkte mechanische Antrieb vom Verbrennungsmotor bis hin zum Rad, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, die bestmögliche Effizienz. Dies resultiert dadurch, dass im Vergleich zum seriellen Antrieb die Umwandlungsverluste bei der parallelen Konfiguration entfallen. Allerdings kann durch die direkte mechanische Verbindung der Verbrennungsmotor nicht mehr stationär und somit nicht mehr unabhängig der Fahrgeschwindigkeit im optimalen Bereich arbeiten. Dies hat nachteilige Auswirkungen auf Verbrauch und Emissionen. [7] [15] [16]

- **Einsatzgebiete**

Der am häufigste eingesetzte parallele Hybridantrieb ist die Konfiguration der E-Maschine in P2-Anordnung. Mit einem P2-Hybridantrieb können alle Funktionen aus Abschnitt „6.1.3.1 Funktionen und Strategien hybrider Antriebsstränge“ umgesetzt werden. Die elektrische Maschine kann dabei relativ kompakt ausgeführt werden und befindet sich auf der Getriebeeingangsseite. Die P0- und P1-Konfiguration findet vorwiegend bei kleinen Elektrifizierungsgraden mit kleinen Batteriespeicherkapazitäten Anwendung. Hybridantriebe in P3-Konfiguration finden vor allem bei leistungsstarken Sportfahrzeugen Anwendung. Durch Anordnung der E-Maschine nach dem Getriebe kann das Drehmoment des E-Motors direkt und ohne Getriebeübersetzungen genutzt werden, was vor allem bei Beschleunigungsphasen Vorteile mit sich bringt. Bei P4-Hybride können Front-, Heck- und Allradantrieb problemlos umgesetzt werden. Die Antriebsleistung kann dabei je nach Bedarf beliebig auf die beiden Achsen aufgeteilt werden. [7] [15] [16]

1.3.2.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb (Kombination aus Serieller und Paralleler Hybrid)

- **Aufbau**

Bei einem leistungsverzweigten- oder kombinierten Hybridantrieb wird die vom Verbrennungsmotor generierte Leistung in einen mechanischen- und einen elektrischen Pfad unterteilt. Die Leistungsaufteilung erfolgt meist mit einem Planetengetriebe, wodurch sich flexible Übersetzungen sowie kostensparende Verknüpfungen der beiden Pfade umsetzen lassen. Im Vergleich zu Automatik- und automatisierten Schaltgetrieben ermöglichen leistungsverzweigte Getriebe, eine Reduktion von mechanischen Getriebekomponenten bei gleichen Fahrleistungen. Damit kann eine serielle- und eine parallele Konfiguration mit einem Antriebssystem realisiert werden. [7] [15] [16]

Eine leistungsverzweigte Hybridantriebseinheit besteht aus mindestens zwei elektrischen Maschinen mit dazugehöriger Leistungselektronik und enthält meist Planetensätze, einfache Getriebeübersetzungen und Kupplungen. Die Auswahl der Übersetzungen hat erheblichen Einfluss auf die Leistungsflüsse der einzelnen Lastpfade. [7] [15] [16]

- **Prinzip der Leistungsverteilung**

Die zentrale Komponente zur Leistungsaufteilung auf den mechanischen und den elektrischen Pfad ist das Planetengetriebe. Zum besseren Verständnis vom Aufbau sowie Prinzip eines Planetengetriebes ist in Abbildung 1-25 der Aufbau eines allgemeinen Planetengetriebes dargestellt. Die Hauptkomponenten zur Leistungsübertragung bestehen aus dem Sonnenrad, dem Planetenträger (oft auch Steg genannt) mit den Planetenrädern und dem Hohlrad.

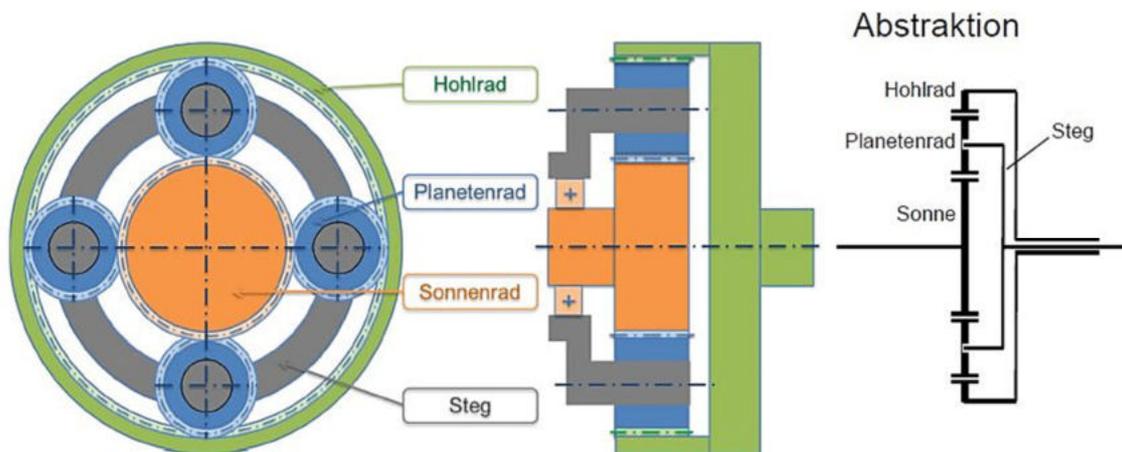


Abbildung 1-25: Aufbau eines allgemeinen Planetengetriebes mit Abstraktion [17]

Sowohl das Sonnen- als auch das Hohlrad sind auf von außen zugänglichen Wellen herausgeführt. Die Planetenräder sind immer gleichzeitig mit dem Sonnen- sowie dem Hohlrad im Eingriff. Je nach Anforderung und Auslegung kann eine unterschiedliche Anzahl von Planetenrädern ausgeführt werden. Die Drehbewegung der Planetenräder wird über den Steg auf eine externe Welle übertragen. Der Steg übernimmt die Führung der Planetenräder. Insgesamt besitzt ein Planetengetriebe drei Wellen, die zur Drehmomentübertragung genutzt werden können. Zur konstruktiven Umsetzung muss mindestens eine Welle als Hohlwelle ausgeführt werden. Aufgrund der runden kompakten Bauform eines Planetengetriebes kann neben einer Materialeinsparung auch die Baugröße deutlich verringert werden. [17]

- **Ausgeführtes Beispiel eines leistungsverzweigten Hybridgetriebes**

Das wohl bekannteste Fahrzeug mit einem leistungsverzweigten Hybridantrieb ist der Toyota Prius, siehe auch Abschnitt „6.1.3.4 Ausgeführte Hybridfahrzeuge“. In Abbildung 1-26 ist der schematische Aufbau des leistungsverzweigten Hybridgetriebes in seiner ersten Generation ersichtlich. Um Drehungleichförmigkeiten zu reduzieren, ist nach dem Verbrennungsmotor ein Torsionsschwingungsdämpfer verbaut. Die VKM ist mit dem Planetenträger des Planetengetriebes verbunden, der die Leistung in einen mechanischen- und einen elektrischen Teil aufteilt. Der Generator sitzt am Sonnenrad, welches konstruktiv als Hohlwelle ausgeführt ist. Neben der Startfunktion für den Verbrennungsmotor versorgt der Generator den E-Motor (nicht VKM) sowie das Batteriesystem mit elektrischer Energie. Der E-Motor ist mit dem Hohlrad und dem Kettenantrieb verbunden. Der E-Motor stellt zusätzliche elektrische Leistung für den Fahrtrieb zur Verfügung. Er kann aber, je nach Fahrzustand auch als Generator arbeiten und elektrische Leistung in die Batterie einspeisen. Die Drehzahlanpassung zwischen VKM und Rädern kann bei diesem Getriebe stufenlos erfolgen. Bei einer vorgegebenen Drehzahl der VKM wird mittels variabler Generator- und Sonnenraddrehzahl die Drehzahl des Hohlrades und Abtrieb eingestellt. Es sind keine vorgegebenen Übersetzungsstufen sowie Anfahrkupplungen erforderlich sind. [7] [14]

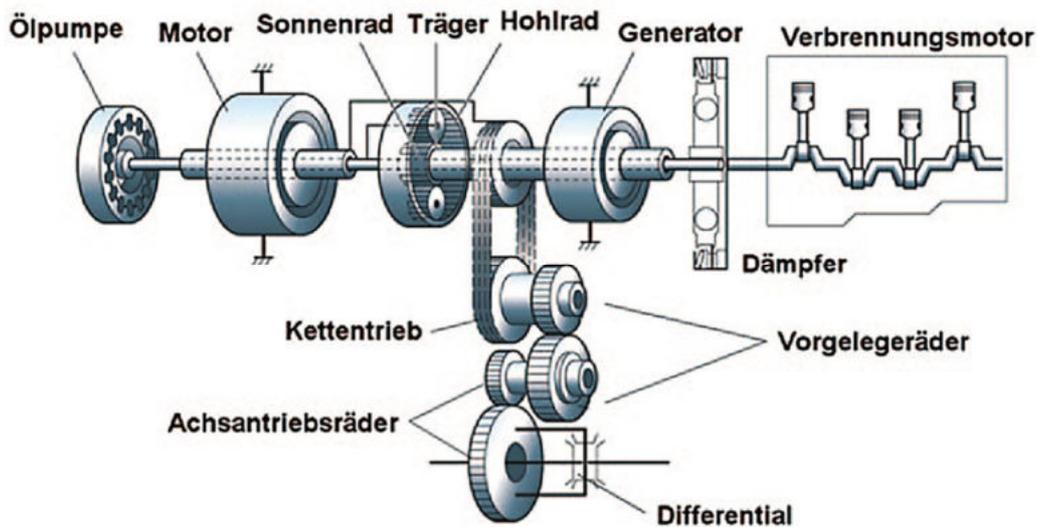


Abbildung 1-26: Schematische Darstellung eines leistungsverzweigten Hybridgetriebes (One-Mode) von Toyota [7]

Aufgrund des Planetengetriebes ist der mechanische Antriebspfad der VKM mit dem Abtrieb und dem Generator verbunden. Zur Leistungsunterstützung kann der Generator jedoch auch im motorischen Betrieb arbeiten und zusätzliche Leistung zur Verfügung stellen. Das System erlaubt auch das rein elektrische Fahren mit abgestelltem Verbrennungsmotor, indem sich beide E-Maschinen mit entgegengesetzter Drehrichtung bewegen. Die Rekuperation von Bremsenergie erfolgt über die direkte Kopplung des Kettentriebs mit dem Hohlrad und dem E-Motor. [7] [14]

- **Vor- und Nachteile**

Der Verbrennungsmotor kann durch ein leistungsverzweigtes Getriebe in weiten Bereichen in seinem optimalen Betriebsbereich arbeiten, wodurch der Kraftstoffverbrauch reduziert werden kann. Des Weiteren kann auf den Einsatz von zusätzlichen Getrieben verzichtet werden, wodurch Bauraum eingespart werden kann. Grundsätzlich sind als Vorteile die Möglichkeit des Betriebs im seriellen und parallelen Modus zu nennen. Der leistungsverzweigte Hybridantrieb stellt jedoch in der Regelung seiner Betriebsmoden das komplexeste Antriebssystem dar. [7] [14]

1.3.3 Klassifizierung nach Elektrifizierungsgrad

Bei der Klassifizierung des Hybridisierungs- beziehungsweise Elektrifizierungsgrades steht die Speicherkapazität und die Leistung der Antriebsmaschinen im Fokus. Demnach wird mit zunehmenden Elektrifizierungsgrad unterschieden: [7]

- Start-Stopp-System
- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid
- Plug-In-Hybrid (klassisch)
- Plug-In-Hybrid mit Range-Extender (E-Fahrzeug)

Im Prinzip können unterschiedliche Elektrifizierungsgrade mit unterschiedlichen Hybridarchitekturen verbunden werden. Abbildung 1-27 zeigt hierfür sinnvolle und gebräuchliche Kombinationen. Die Hybridarchitektur bezeichnet dabei, die Anordnung und Kombination der mechanischen und elektrischen Komponenten und Energieflüsse im Antriebsstrang. Der Elektrifizierungsgrad eines Hybridfahrzeugs charakterisiert die rein elektrische Antriebsleistung bezogen auf die Gesamtleistung des Antriebs (VKM und E-Maschine) und die elektrische Speicherkapazität. Unter Berücksichtigung der Lademöglichkeit für die Batterie erfolgt eine weitere Unterteilung. Bei einem Autarken-Hybrid ist ein Laden der Batterie nur durch den Verbrennungsmotor und interne Generatoren möglich. Beim Plug-In-Hybrid hingegen kann das Aufladen des Batteriesystems zusätzlich über eine externe Stromquelle wie beispielsweise das Stromnetz erfolgen. [7]

Hybrid-Architektur \ Elektrifizierungsgrad		Micro	Mild	Full	Plug-In	Plug-In
					klassisch	Range-Extender
Seriell				●	●	●
Parallel	P0	●	●			
	P1	●	●			
	P2		●	●	●	
	P3		●	●	●	
	P4			●	●	
Leistungsverzweigt				●	●	
VKM-Antrieb dominierend						E-Maschinen-Antrieb dominant

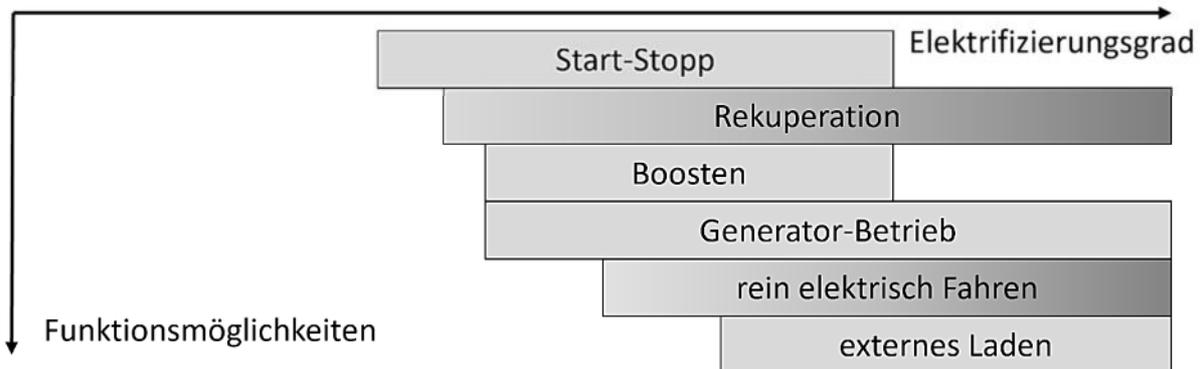


Abbildung 1-27: Übersicht der gebräuchlichsten Kombinationen von Hybridarchitekturen und Elektrifizierungsgrade mit Übersicht der Grundfunktionen

Abbildung 6-27 liefert des Weiteren in Abhängigkeit vom Elektrifizierungsgrad eine Übersicht der Grund-Funktionsmöglichkeiten von Hybridfahrzeugen. So ist ersichtlich, dass beim Micro-Hybrid die Rekuperation nur eingeschränkt möglich ist. Außerdem ist das rein elektrische Fahren bei einem Mild-Hybrid in Regel nicht oder nur stark eingeschränkt realisierbar. Um die Funktionalitäten für bestimmte Ausführungen zu erweitern, können auch Mischformen in einem spezifischen Umfang realisiert

werden. So kann beispielsweise bei einer P3- oder P4-Konfiguration zusätzlich eine P0- oder P1-Anordnung ausgeführt werden, um das Antriebssystem mit der Start-Stopp-Funktion zu erweitern. Es kann auch bei einem seriell ausgeführten Hybridfahrzeug der Verbrennungsmotor zusätzlich an eine Achse angekuppelt werden, was einer P4-Konfiguration entspricht.

	nur Unterstützung der VKM				rein elektrisches Fahren möglich	
	Autarker Hybrid				Plug-In-Hybrid	
	Start-Stopp	Micro	Mild	Full	klassisch	Range-Extender
Elektrifizierungsgrad	<< 5%	< 5%	5-10%	10-50%	30-60%	50-80%
Leistung E-Maschine	2-3 kW	5-8 kW	10-20 kW	> 25 kW	40-70 kW	40-150 kW
Spannungsniveau	12V	12-48V	48-150V	150-400V	350-400V	350-400V
Batteriekapazität	<< 1 kWh	<< 1 kWh	< 1 kWh	1-5 kWh	5-20 kWh	8-25 kWh
Ausgeführtes Beispiel		Mercedes A,B-Klasse	VW Golf	Toyota Prius	BMW X5 eDrive	Opel Ampera

Tabelle 1-1: Unterteilung Hybridantriebe nach Elektrifizierungsgrad, Spannungsniveau und Batteriekapazität [7]

Mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad steigen somit auch das Spannungsniveau und daher die Leistung der E-Maschine sowie die elektrische Speicherkapazität, siehe Tabelle 1-1. Die Tabelle ist an [7] angelehnt und hat keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung der unterschiedlichen Varianten. Nachfolgend werden häufig ausgeführte Hybrid-Fahrzeugarchitekturen mit deren jeweiligen Vor- und Nachteile und Funktionsmöglichkeiten aufgezeigt und beschrieben.

1.3.3.1 Start-Stopp-Systeme

Bei dieser Hybridvariante wird der Antrieb ausschließlich und direkt durch die vom Verbrennungsmotor gelieferte mechanische Energie gewährleistet. Im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug gibt es hier nur geringe Veränderungen des Antriebssystems. Grundsätzlich wird der traditionelle Anlasser durch einen leistungsfähigeren Anlasser oder durch einen Riemen-Starter-Generator ersetzt. Bei einem Stillstand des Fahrzeugs, wie beispielsweise bei einer Ampel oder bei Stau, wird bei Unterbrechung des Antriebsstrangs sowie bei ausreichender Batteriekapazität der Verbrennungsmotor abgestellt. Es muss bei Motorstillstand gewährleistet sein, dass die vom Verbrennungsmotor mechanisch angetriebenen Nebenaggregate, wenn deren Funktionen während des Stillstands notwendig sind, nun elektrisch angetrieben werden müssen, wie zum Beispiel Ventilatoren, Vakuumpumpe, Klimaanlage oder Öldruck für Automatikgetriebe. Die Betätigung der Kupplung oder bei Automatikgetrieben das Lösen der Bremse bewirken ein automatisches Starten des abgestellten Motors. Bei Abfall der Batteriespannung oder zu geringer Restkapazität der Batterie wird der Motor ebenfalls automatisch wieder gestartet. Aufgrund der häufigeren Startvorgänge ist bei einem Start-Stopp-System ein verstärkter Ritzelstarter erforderlich. [7] [14]

Die Batterie muss auch der deutlich höheren Anzahl an Startvorgängen standhalten. Um bei Startvorgängen mögliche Änderungen des Spannungsniveaus im Bordnetz zu vermeiden, kann eine zusätzliche kleinere Batterie zum Stützen der Bordnetzatterie eingesetzt werden. Diese Stützfunktion kann ebenso von einem DC/DC-Wandler ausgeführt werden, welcher allerdings nur zur Versorgung von sensiblen Verbrauchern eingesetzt werden kann. Als Standard-Batterie kommt meist ein

fortschrittlicher Bleiakкумуляtor zum Einsatz. Optional kann ein Micro-Hybridssystem mit einem 48 Volt-Bordnetz ausgeführt sein, aber typischerweise sind diese mit einem 12 Volt Spannungsniveau realisiert. [7] [14]

1.3.3.2 Micro-Hybrid

In nachfolgender Abbildung 1-28 ist der Vergleich des allgemeinen Aufbaus und der Energieflüsse zwischen reinem Start-Stopp-System und Micro-Hybridssystem dargestellt.

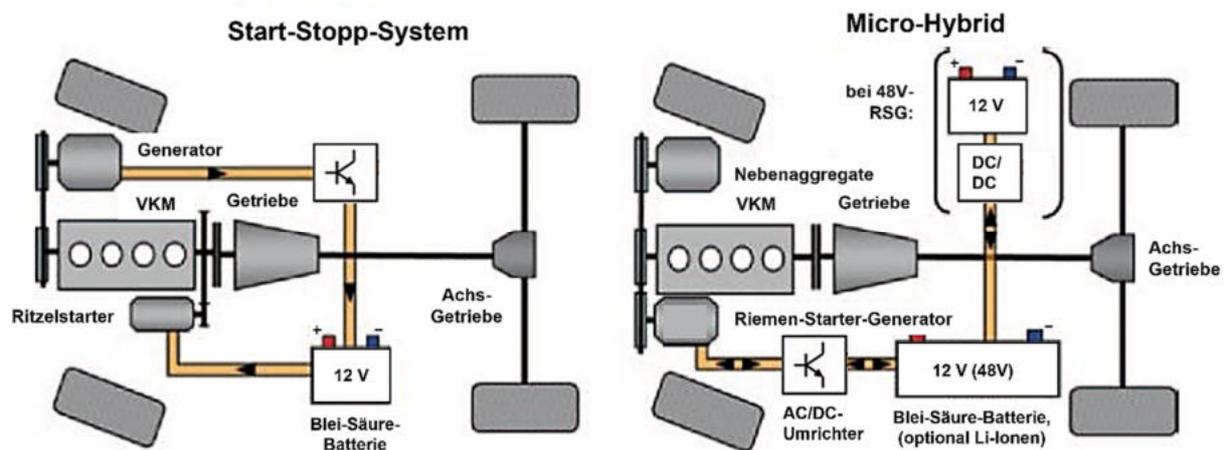


Abbildung 1-28: Vergleich Start-Stopp-System und Micro-Hybridantriebssystem [7]

Bei einem Micro-Hybridantriebssystem wird ein Riemen-Starter-Generator eingesetzt. Dieser ermöglicht, im Unterschied zu reinen Start-Stopp-Systemen, in einem limitierten Ausmaß eine Rekuperation der Bremsenergie im Schubbetrieb des Verbrennungsmotors, um die Bordnetzatterie über den Generator zu laden. [7]

Um die Aufnahmefähigkeit der Batterie zu überwachen, wird ein Batteriemanagementsystem genutzt. Hierzu wird ein Ladezustandssensor eingesetzt. Bei Beschleunigungsphasen wird das gesamte Bordnetz ausschließlich durch die Batterie gespeist, sodass die gesamte Motorleistung zur Beschleunigung zur Verfügung steht. Sollte der Ladezustand der Batterie ungenügend sein, wird der Generator wieder aktiviert. [7]

Der Micro-Hybrid mit Riemen-Starter-Generator ist ein parallel Hybrid mit P0-Konfiguration und ist ein wichtiger erster Schritt in der Elektrifizierung des Verbrennungsmotors und die damit verbundene Möglichkeit zur Verbrauchseinsparung. [7]

1.3.3.3 Mild-Hybrid

Aufbau

Ein Mild-Hybridantriebssystem besitzt einen höheren Elektrifizierungsgrad als ein Micro-Hybridssystem. Dadurch kann zusätzlich zur Start-Stopp- und der Rekuperationsfunktion auch die Unterstützung des Verbrennungsmotors in der Anfahr- und Beschleunigungsphase mittels einer Boost-Funktion umgesetzt werden. Neben der VKM als primäre Antriebsmaschine verfügt ein Mild-Hybrid über eine elektrische Maschine mit einer Leistung von bis zu ca. 20 kW. Zusätzlich zum 12-Volt-Niederspannungsbordnetz ist ein Batteriesystem bei einem Spannungsniveau zwischen 48-150 Volt im

System integriert. Aufgrund der erhöhten Spannungslage im Bordnetz können die elektrische Maschine sowie die Nebenaggregate mit einer höheren Leistung betrieben werden. Dadurch kann neben einer Effizienzsteigerung durch verstärktes Rekuperieren auch die Startzeit der Verbrennungskraftmaschine reduziert werden. Als zusätzliche Funktion kann die Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors zur Verbrauchseinsparung beitragen. Abbildung 1-29 zeigt eine P1-Anordnung für ein Mild-Hybridantriebssystem. [7]

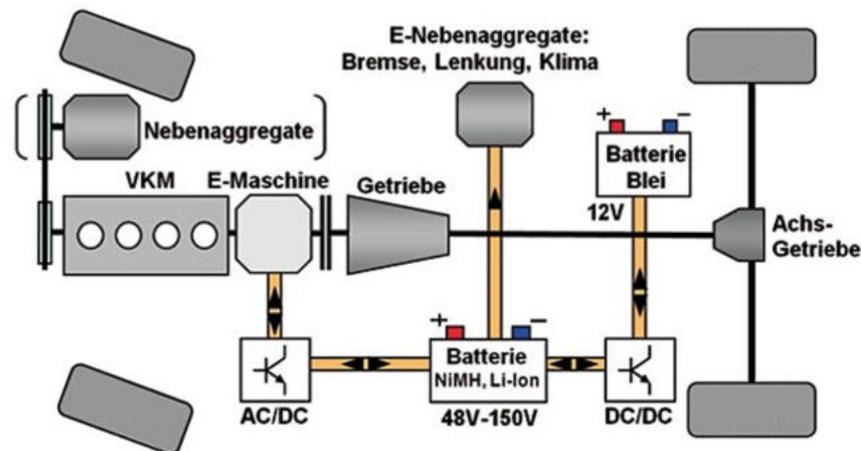


Abbildung 1-29: Mild-Hybridantriebssystem – Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7]

Vor- und Nachteile

Die elektrische Maschine eines Mild-Hybridsystems kann direkt mit der Kurbelwelle verbunden sein und ist häufig zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe positioniert. Diese Ausführung wird als Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG) bezeichnet. Das Antriebsmoment der VKM wird bei der Anfahr- und Beschleunigungsunterstützung durch das Drehmoment des Elektromotors gesteigert, was sich positiv auf das dynamische Fahrverhalten vor allem im unteren Drehzahlbereich auswirkt. Rein elektrisches Fahren ist in der Regel nicht oder nur über eine sehr kurze Strecke (z.B. Parkvorgänge) möglich, da durch die direkte Kopplung der elektrischen Maschine mit der Kurbelwelle auch das Schleppmoment des abgestellten Verbrennungsmotors überwunden werden muss. Durch Zylinderabschaltung in dieser Betriebsart kann dieses Schleppmoment verringert werden. Ein Inverter (Wechselrichter) erzeugt aus dem Gleichstrom der Traktionsbatterie den Wechselstrom für die E-Maschine und umgekehrt, falls rekuperiert wird. [7]

Im Niederspannungsbordnetz dient eine konventionelle 12-Volt-Bleisäure-Batterie zur Versorgung der Niedervoltverbraucher. Diese Batterie wird über einen Gleichspannungswandler ebenfalls von der Traktionsbatterie versorgt. Für die Traktionsbatterie kommt die Nickel-Metallhydrid- oder Lithium-Ionen-Technologie zum Einsatz, je nach spezifischen Anforderungen des Fahrzeugs. Des Weiteren steigt die Anforderung an die Steuergeräte, welche für das Batteriemanagementsystem und zur Koordination der Betriebszustände benötigt werden. [7]

Einsatzgebiet

Bei Mild-Hybridisierungen liegt ein besonderer Fokus auf P1 und P3 Konfigurationen mit 48-Volt-Bordnetz. Speziell in Bezug auf Fahrleistung und Verbrauchseinsparung bieten Mild-Hybridfahrzeuge eine kostengünstige und attraktive Lösung für kleine und mittlere Fahrzeugklassen.

1.3.3.4 Full-Hybrid

Der Full-Hybrid (engl.) oder auch Vollhybrid genannt, besitzt im Vergleich zum Mild-Hybridsystem eine höhere Batteriekapazität, höhere Leistung der E-Maschine und einen vergrößerten Funktionsumfang. In Abhängigkeit von der Antriebsarchitektur können die Energieflüsse parallel, seriell oder leistungsverzweigt verlaufen. Bei parallel oder leistungsverzweigten Hybriden kann der Fahrtrieb wahlweise rein elektrisch, rein verbrennungsmotorisch oder kombiniert erfolgen. [7]

Aufbau

Der Aufbau eines typischen P2- Full-Hybridantriebssystems mit Anordnung der Komponenten sowie elektrischem Aufbau ist in Abbildung 1-30 ersichtlich. Im Gegensatz zum Mild-Hybridsystem sind einige konstruktive Änderungen im Antriebsstrang erforderlich. So können beispielsweise eine zusätzliche Kupplung, eine oder mehrere elektrische Maschinen mit hoher Antriebsleistung und ein Hochvoltbatteriesystem mit hoher Kapazität erforderlich sein. Durch die Trennkupplung kann der Verbrennungsmotor abgekoppelt werden, sodass dieser beim rein elektrischen Fahren nicht mehr mitgeschleppt werden muss. [7]

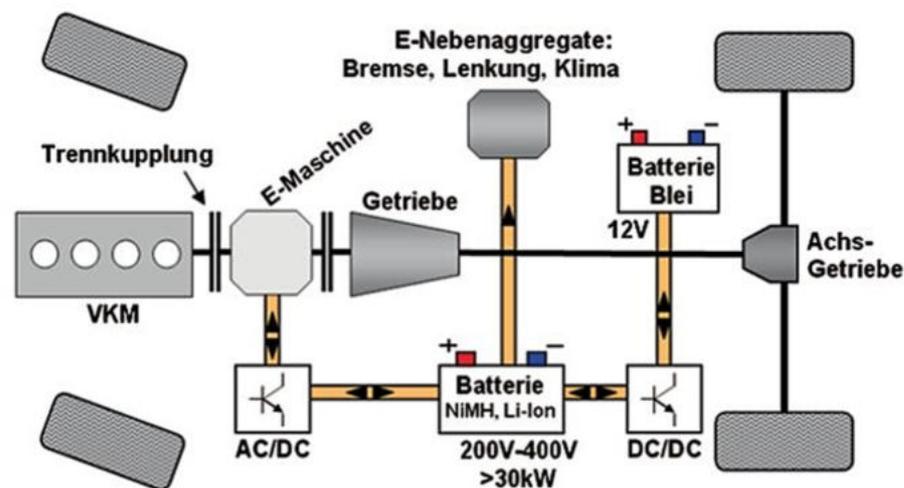


Abbildung 1-30: Full-Hybridantriebssystem – Typische P2-Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7]

Um möglichst viel kinetische Energie beim Bremsvorgang speichern zu können, muss die Hochspannungsbatterie eine hohe maximale Leistungsaufnahme besitzen. Hierfür kommen vorwiegend Batterien mit Lithium-Ionen-Technologie zum Einsatz. Parallel zum Hochspannungsbordnetz wird für die Niedervoltverbraucher ein konventionelles 12-Volt-Bordnetz eingesetzt. Die Blei-Säure-Niederspannungsbatterie wird durch die Hochvoltbatterie und einen Gleichspannungswandler versorgt. Wie beim Mild-Hybridsystem ist ein Umrichter erforderlich, um die Wechselspannung für die E-Maschine bereitzustellen. Ein konventioneller Generator (Lichtmaschine) ist nicht mehr erforderlich. Je nach Auslegung des Systems wird, ähnlich wie beim Mild-Hybrid, der konventionelle Anlasser unter bestimmten Umständen beibehalten, um bei sehr niedrigen Temperaturen den Kaltstart des Verbrennungsmotors zu garantieren. [7]

Vor- und Nachteile

Das Spannungsniveau für den elektrischen Fahrtrieb und der Hochvoltbatterie beträgt hier zwischen 150 und 400 Volt. Aufgrund dieser hohen Spannungslage stehen bei Vollhybriden sehr hohe Leistungen für den Antrieb zur Verfügung. Dadurch lassen sich elektrische Antriebsleistungen von ca. 25 kW bis über 80 kW umsetzen. Aufgrund der günstigen Drehmomentcharakteristik der elektrischen Maschine bei niedrigen Drehzahlen kann beim Beschleunigungsvorgang ein sehr hohes Drehmoment abgerufen

werden. Durch Zusammenspiel von Verbrennungs- und E-Motor lassen sich mit geeigneten Betriebsstrategien sehr gute Beschleunigungswerte, hoher Fahrspaß, hohe Kraftstoffeinsparung und signifikant verkleinerter VKM realisieren. Allerdings nimmt damit die Komplexität des Systems deutlich zu. [7]

Einsatzgebiet

Ein Vollhybrid-Antriebssystem wird häufig mit paralleler oder leistungsverzweigter Architektur ausgeführt. So bieten Vollhybride in Abhängigkeit der Energieflussstrategie die Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu Mild-Hybriden weiter zu senken. Die rein elektrischen Reichweiten sind gering und betragen meist deutlich weniger als 10 km. [7]

1.3.3.5 Plug-In-Hybrid – klassische Ausführung

Plug-In-Fahrzeuge bilden eine Mischform zwischen verbrennungsmotorischem und rein elektrischem Antrieb. Ein Plug-in-Hybridfahrzeug zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, das Batteriesystem über eine externe Stromquelle (z.B. Ladesteckdose) aufzuladen. Die elektrischen Reichweiten liegen meist in der Größenordnung von 50 km. [7]

Aufbau

Abbildung 1-31 zeigt ein Beispiel für die Anordnung der Komponenten sowie den elektrischen Aufbau eines Plug-In-Hybridantriebssystems.

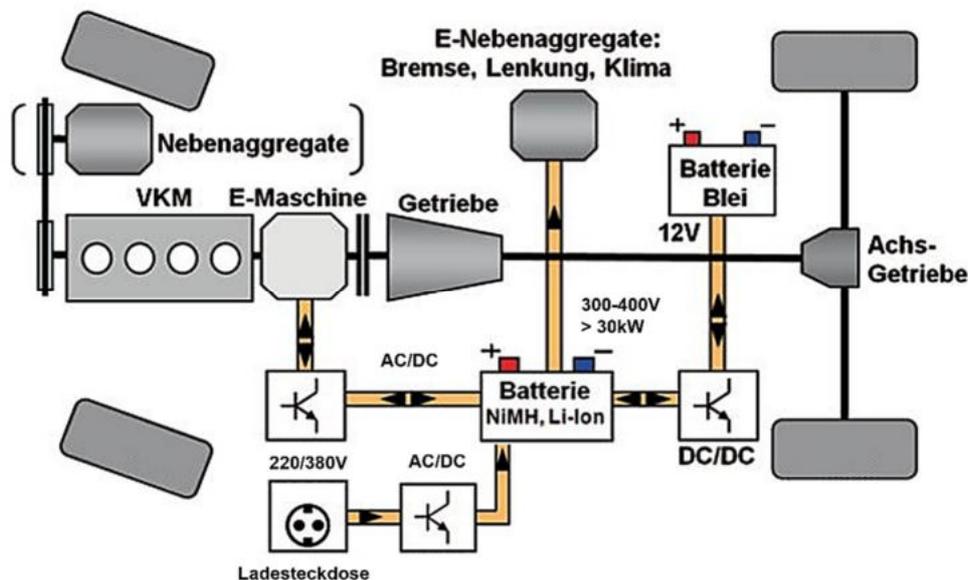


Abbildung 1-31: Plug-In-Antriebssystem – Typische P2-Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7]

Ausgehend von einem Full-Hybridantriebssystem wird bei der Plug-In-Technologie ein Ladegerät in das Hochvoltbordnetz integriert, um damit die externe Nachladung der Batterie mit Wechsel- oder Drehstrom zu ermöglichen. Um deutlich kürzere Ladezeiten zu erreichen, besteht je nach Fahrzeugausführung die Möglichkeit die Hochvoltbatterie mit hoher Ladeleistung direkt mit Gleichstrom zu laden. Dabei entstehen allerdings erhöhte Verlustleistungen, wodurch sich die Temperatur im Batteriesystem erhöht. Um diese Wärme abzuführen, muss die Batterie entsprechend gekühlt werden. Alternative Ladesysteme wie beispielsweise kontaktloses Laden bei Fahrzeugstillstand sind möglich, finden derzeit aber wenig Verbreitung. [7]

Vor- und Nachteile

Das Hauptaugenmerk eines Plug-In-Antriebssystems liegt darauf, die rein elektrische Reichweite signifikant zu erhöhen und die elektrische Energie unabhängig vom Verbrennungsmotor beziehen zu können. Dies erfordert vor allem Batteriesysteme mit einer höheren Energiekapazität. In Abhängigkeit vom Fahrprofil sowie den Umgebungsbedingungen können derzeit elektrische Reichweiten von 30 bis 100 km zurückgelegt werden. Demnach bietet sich die Plug-In-Antriebstechnologie besonders für den täglichen Kurzstreckenverkehr an und ermöglicht es, in Städten weitgehend rein elektrisch und schadstofffrei zu fahren. [7]

Demgegenüber stehen Nachteile wie die derzeit noch hohen Fahrzeugkosten, der große Platzbedarf für die Unterbringung aller Komponenten, das hohe Gesamtgewicht, die hohe Systemkomplexität sowie die Erfordernis einer Ladeinfrastruktur. Bei Langstreckenfahrten mit hoher Geschwindigkeit kommt als Hauptantrieb primär der Verbrennungsmotor zum Einsatz. Plug-In-Hybride weisen in solchen Fahrsituationen aufgrund des erhöhten Gesamtgewichts einen höheren Kraftstoffverbrauch auf. [7]

1.3.3.6 Plug-In-Hybrid mit Range Extender (E-Fahrzeug)

Ein Hybridfahrzeug mit sehr hohem Elektrifizierungsgrad und On-board Lademöglichkeit durch ein Hilfsaggregat, wie z.B. VKM oder auch Brennstoffzelle, stellt eine spezielle Art eines Plug-In-Hybridfahrzeugs dar. Diese werden auch als Elektrofahrzeug mit Range-Extender (Reichweitenverlängerung) bezeichnet. Sie erfüllen, genau wie ein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug, alle Leistungsanforderungen im elektrischen Betrieb. Solche Fahrzeuge weisen demnach die typische Fahrzeugarchitektur eines E-Fahrzeugs auf, mit einer Verbrennungskraftmaschine als „optionaler“ Zusatzausstattung.

Aufbau

Zur Erhöhung der elektrischen Reichweite wird intern eine Ladeinheit ins Antriebssystem integriert. Damit entspricht die Antriebsarchitektur eines Range-Extender-Antriebssystems meist einem seriellen Hybridantrieb mit kleiner VKM oder Brennstoffzelle und hoher Batteriekapazität. Es existiert keine mechanische Verbindung zwischen der Nachladeeinheit und den Antriebsrädern. Der Fahrtrieb wird ausschließlich durch eine elektrische Maschine realisiert, welche über die Leistungselektronik von der Batterie gespeist wird. Die Reichweitenverlängerung kann somit auch als Funktionserweiterung betrachtet werden. Prinzipiell kann die Funktion der Reichweitenverlängerung, aber auch mit einer parallelen oder leistungsverzweigten Hybridarchitektur realisiert werden. [7]

Vor- und Nachteile

Die Standardvariante eines Range-Extender-Moduls ist eine Verbrennungskraftmaschine, welche mit einem elektrischen Generator kombiniert ist. Durch die thermisch-elektrische Energieumwandlung kann im Bedarfsfall elektrische Leistung für den Fahrtrieb sowie für das Nachladen der Hochvoltbatterie zur Verfügung gestellt werden. Der Verbrennungsmotor wird dabei möglichst unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit lastpunktoptimiert bei hoher Effizienz betrieben. Ein definierter Schwellwert des Batterieladestands löst den Start des Verbrennungsmotors aus. Um die Funktion der Reichweitenverlängerung umzusetzen, sind neben dem Range-Extender-Modul selbst noch zusätzliche Komponenten und Systeme erforderlich. So müssen beispielsweise Kraftstofftank, Abgassystem sowie das dafür erforderliche Kühlsystem im Fahrzeug integriert werden. [7] [15]

Als weitere Ausführungsmöglichkeit eines Range-Extenders kann ein Brennstoffzellensystem eingesetzt werden. Ein Vorteil dieser Variante ist die direkte Umwandlung der chemisch gebundenen Energie in elektrische Energie. Darum wird zur Energiewandlung im Vergleich zum VKM-Range-Extender kein Generator mehr benötigt. Diese Variante weist vor allem akustische Vorteile gegenüber der Standardvariante auf. Im Prinzip können verschiedene Wärmekraftmaschinen zur Reichweitenverlängerung betrachtet werden, wie z.B. auch Zweitakt- Wankel- oder Stirlingmotoren.

Abbildung 1-32 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit den Antriebsstrangkomponenten eines Elektrofahrzeugs mit Reichweitenverlängerung. Die E-Maschine wird in diesem Ausführungsbeispiel als Fahrtrieb eingesetzt. [7] [15]

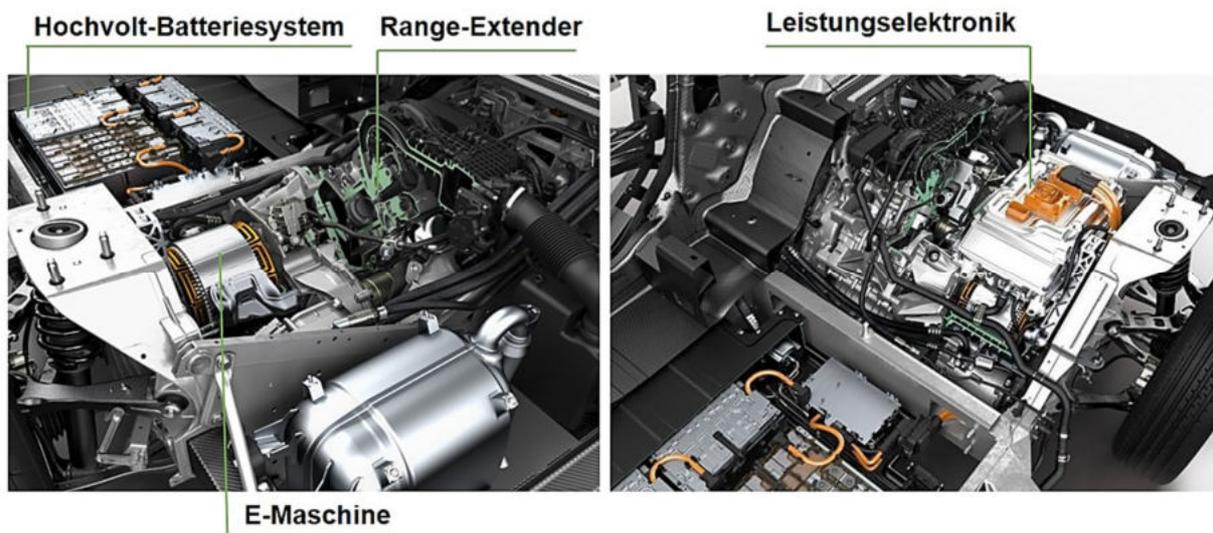


Abbildung 1-32: Ausführung eines Elektrofahrzeugs mit Reichweitenverlängerung - BMW i3 mit Range Extender [18] [19]

Einsatzgebiete

In Abbildung 1-32 kommt als Range-Extender-Modul ein 25 kW starker Zweizylinder-Ottomotor zum Einsatz, welcher in serieller Bauweise mit einem Generator gekoppelt ist und über der Hinterachse des Fahrzeugs angeordnet ist. Der Fahrtrieb erfolgt über die daneben befindliche permanentenerregte Synchronmaschine und erbringt dabei eine maximale Leistung von 125 kW. Über ein einstufiges Getriebe erfolgt der Antrieb der Hinterräder. Um alle elektrischen Energieflüsse bedarfsorientiert regulieren zu können, wird eine gemeinsame Leistungselektronik eingesetzt, welche über der elektrischen Traktionsmaschine positioniert ist, und den Fahrtrieb und Generator bedient. Als Energiespeicher kommt ein Batteriesystem basierend auf Lithium-Ionen-Technologie zum Einsatz. Das im Unterboden des Fahrzeugs angeordnete Batteriesystem, wird mithilfe des Kältemittels der Klimaanlage gekühlt. Um das System bei optimaler Betriebstemperatur von etwa 20 °C zu betreiben, kann bei niedrigen Außentemperaturen die Kühlflüssigkeit über einen Wärmetauscher erwärmt werden. [7]

Abbildung 1-33 zeigt ein Gesamtsystem einer Range-Extender-Einheit bestehend aus einem Wankelmotor und einem Generator mit Leistungselektronik. Alle erforderlichen Komponenten und Systeme für den Range-Extender-Betrieb sind dabei in eine kompakte einbaufertige Einheit integriert. Solch alternative Systeme haben sich in der Praxis bisher nicht durchgesetzt und werden aktuell in der Automobilindustrie nicht mehr verfolgt.

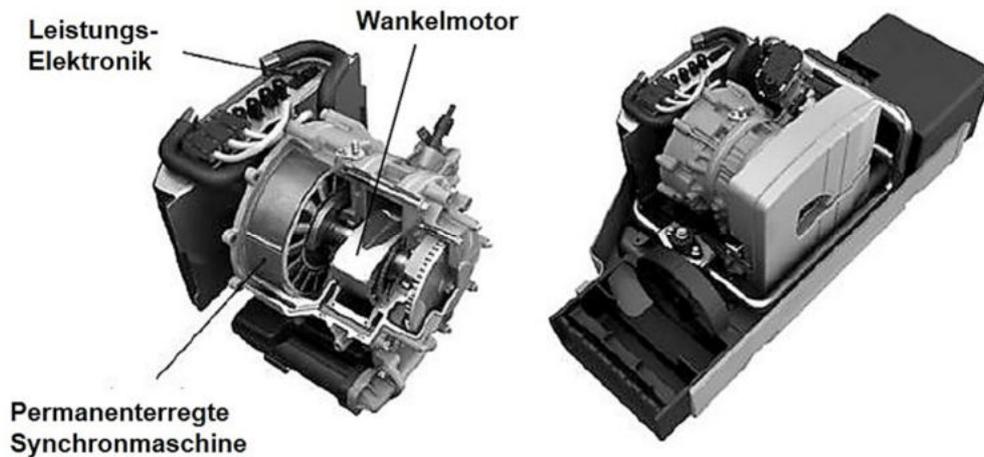


Abbildung 1-33: Ausführung Range-Extender-Einheit mit Wankelmotor im Gesamtsystem [20]

Die Anzahl der Energiewandlungen zwischen Reichweitenverlängerungs-Modul und Antrieb der Räder ist entscheidend für den Gesamtwirkungsgrad. Der konventionelle Viertakt-Ottomotor erfüllt allerdings die spezifischen Anforderungen an Bauraum, Gewicht, Akustik, Kosten und Verfügbarkeit am besten und ist somit die am häufigsten verbaute Ausführung von Range-Extender Modulen.

Bei der Konzeption von batterieelektrischen Fahrzeugen bildet die Ausführung mit Reichweitenverlängerung eine Alternative, um hohe Reichweiten zu erzielen. Auch die kurze Betankungsdauer des Range-Extenders ist dabei ein entscheidender Faktor. In Verbindung mit einer Reichweitenverlängerung können die Batterien auch kleiner dimensioniert werden, was Gewicht und Kosten spart. Allerdings haben sich sowohl die Batterietechnologie als auch die Ladetechnik und die Ladeinfrastruktur in der Zwischenzeit verbessert, sodass der Bedarf an Systemen mit Reichweitenverlängerung deutlich gesunken ist. [7] [15]

1.3.4 Ausgeführte Hybridfahrzeuge

Dieses sehr umfangreiche Kapitel dient als Ergänzung und zeigt ausgeführte Hybridantriebs-Architekturen.

Mild-Hybrid-Architekturen

Abbildung 1-34 zeigt eine schematische Darstellung mit den wesentlichen Komponenten eines 48-Volt Mild-Hybrid-Gesamtsystems in PO-Anordnung. Die Mild-Hybrid-Technologie mit PO-Konfiguration ermöglicht bei vergleichsweise geringem Integrationsaufwand einen hohen Funktionsumfang mit niedrigen Kosten. Der Riemen-Startergenerator wirkt dabei über einen Riementrieb direkt auf die Kurbelwelle. Diese Einheit kann auf der Seite des Verbrennungsmotors eingebunden werden, auf welcher sich bereits die riemengetriebenen Nebenaggregate befinden. [21]

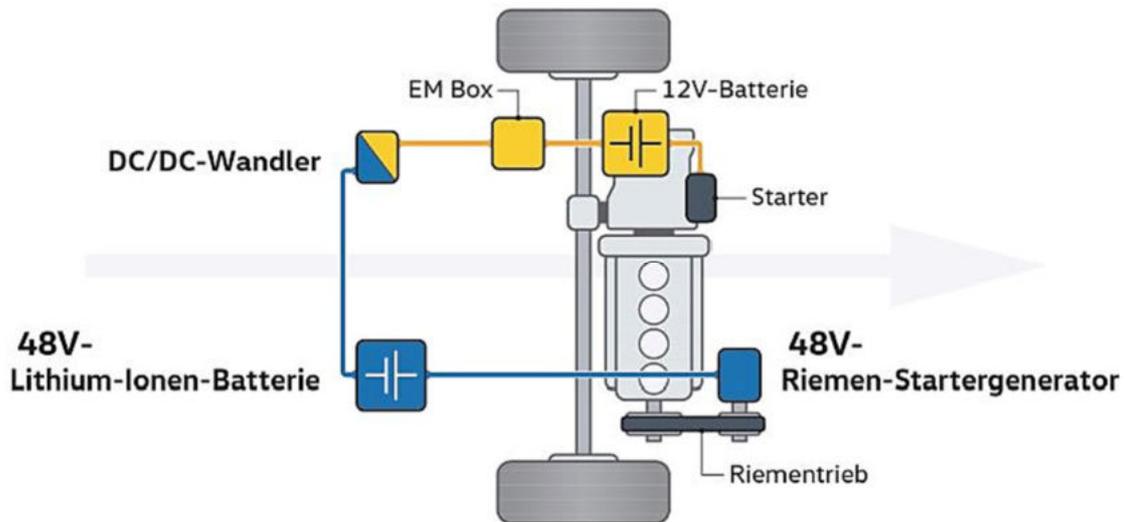


Abbildung 1-34: Schematische Darstellung des 48-Volt Mild-Hybrid-Gesamtsystem in P0-Konfiguration – Beispiel Volkswagen Golf 8 [21]

In Abbildung 1-35 ist die Anordnung der Komponenten dieses 48-Volt Mild-Hybrid-Systems im Fahrzeug dargestellt. Die Riemen-Startergenerator-Einheit (RSG) übernimmt im Antriebssystem eine Reihe von Funktionen. Zum einen dient diese als Startereinheit und zum anderen wirkt diese als kompakte elektrische Maschine, welche sowohl als Motor als auch als Generator genutzt wird. In Verzögerungsphasen oder im Schubbetrieb wird die elektrische Maschine als Generator genutzt, um die kinetische Energie des Fahrzeugs zurückzugewinnen und diese in die 48-Volt-Batterie zu speichern. Um den Verbrennungsmotor beim Anfahren sowie beim Beschleunigungsvorgang zu unterstützen, wird zur Erhöhung der Fahrdynamik der RSG als Elektromotor betrieben und so zusätzliches Antriebsdrehmoment zur Verfügung gestellt. Der eingesetzte Riemen stellt bei einer P0-Anordnung das leistungsbegrenzende Element dar. Mithilfe der Übersetzung des Riementriebs erfolgt die Anpassung an den jeweiligen Verbrennungsmotor. Die maximale Leistung beträgt je nach gewählter Riemenübersetzung in etwa 10-15 kW. Das Spannsystem mit doppelarmigem Riemenspanner gewährleistet die Kraftübertragung sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb des RSG. [21]

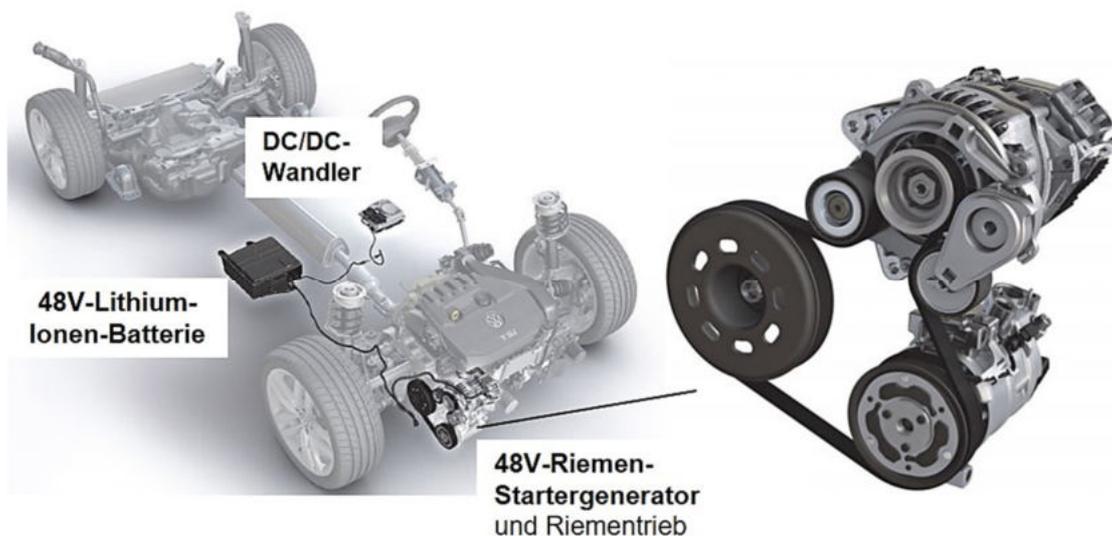


Abbildung 1-35: Komponenten des 48V-Mild-Hybrid-Systems mit Riemen-Startergenerator-Einheit [21]

Neben der Boost-, Rekuperation- sowie Start-Stopp-Funktion können mit der Riemen-Startergenerator-Einheit noch weitere Zusatzfunktionen umgesetzt werden. So kann der Verbrennungsmotor bei konstantem Betrieb nahe an seinem effizientesten Bereich arbeiten, während der Startergenerator als zusätzliche Motorlast elektrische Energie generiert und diese in die Batterie einspeichert und später als Antriebsunterstützung nutzt. [21]

In bestimmten Fahrsituationen, wenn der Verbrennungsmotor nicht unbedingt benötigt wird, kann dieser abgestellt und vom Antriebsstrang abgekuppelt werden, um so zusätzlich Kraftstoff einzusparen. In solchen Phasen wird die bereits vorhandene kinetische Energie des Fahrzeugs zur Fortbewegung genutzt, anstelle diese durch Reibungsverluste zu verlieren. Diese Funktion wird als Segeln bezeichnet und erfolgt bereits beim Ausrollen des Fahrzeugs, wenn der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt. Um den Verbrennungsmotor vom Antriebsstrang abzukoppeln, ist allerdings eine automatisierte Anfahrkupplung erforderlich. Im Segelmodus wird der Betrieb von sicherheitsrelevanten Komponenten wie beispielsweise Servolenkung oder Bremskraftverstärker über das 48-Volt-Bordnetz gewährleistet. Im Falle einer Lastanforderung wird der Verbrennungsmotor automatisch und nicht merkbar für den Fahrer mit dem RSG eingeschaltet. Das Weiter ermöglicht der RSG durch Drehmomenteingriffe eine Drehzahlanpassung des Verbrennungsmotors, um dadurch komfortable Schaltvorgänge bei Automatikgetrieben zu realisieren. Außerdem kann durch RSG-Eingriffe die Motordrehzahl im Leerlauf geregelt werden. Das rein elektrische Fahren ist aber mit einem P0-Mildhybridsystem nicht möglich. [21]

Bei einer weiteren Ausführungsmöglichkeit für ein Mild-Hybridantriebssystem ist der Starter-Generator zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe direkt auf der Kurbelwelle positioniert. Wobei die im Kurbelgehäuse integrierte Starter-Generator-Einheit (ISG) noch vor der Anfahrkupplung angeordnet ist. Eine solche Konfiguration wird als P1-Mild-Hybrid bezeichnet. Der Elektrifizierungsgrad ist in der Regel etwas höher als bei einer P0-Mild-Konfiguration, sodass der integrierte Starter-Generator im Motorbetrieb mit einer maximalen Leistung von bis zu 20 kW ausgeführt werden kann. Bei diesem Hybridantriebssystem stellt der Stator-Generator selbst oder der dazu erforderliche Wechselrichter die Begrenzung der übertragbaren Leistung dar. [22]

Abbildung 1-36 zeigt die schematische Darstellung von einem P1-Mildhybridsystem und ein ausgeführtes Antriebsaggregat mit seinen 48-Volt betriebenen Komponenten. Es wird ein auf der Kurbelwelle sitzender integrierter Starter-Generator (ISG) eingesetzt. Auch hier kommt ein kombiniertes 12V/48V-Bordnetz zum Einsatz. Um das konventionelle 12-Volt Bordnetz mit Energie aus dem 48-Volt-Bordnetz zu versorgen, ist ein Gleichspannungswandler im System integriert. Das 12-Volt-Bordnetz dient dabei zur Energieversorgung der konventionellen Niedervoltverbraucher. Als Energiespeicher wird eine 48-Volt-Batterie eingesetzt, welche alle 48-Volt-Komponenten mit elektrischer Leistung versorgt. Durch die erhöhte Spannungslage können deutlich höhere Energiemengen aufgenommen werden und dadurch auch höhere Leistungen abgegeben werden. Um die mechanische Verlustleistung zu reduzieren, kann durch Elektrifizierung der Nebenaggregate der Riementrieb wegfallen. So sind neben dem ISG elektrisch betriebene Komponenten wie Wasserpumpe, Kältemittelverdichter und Zusatzverdichter in 48-Volt Ausführung realisiert. [22]

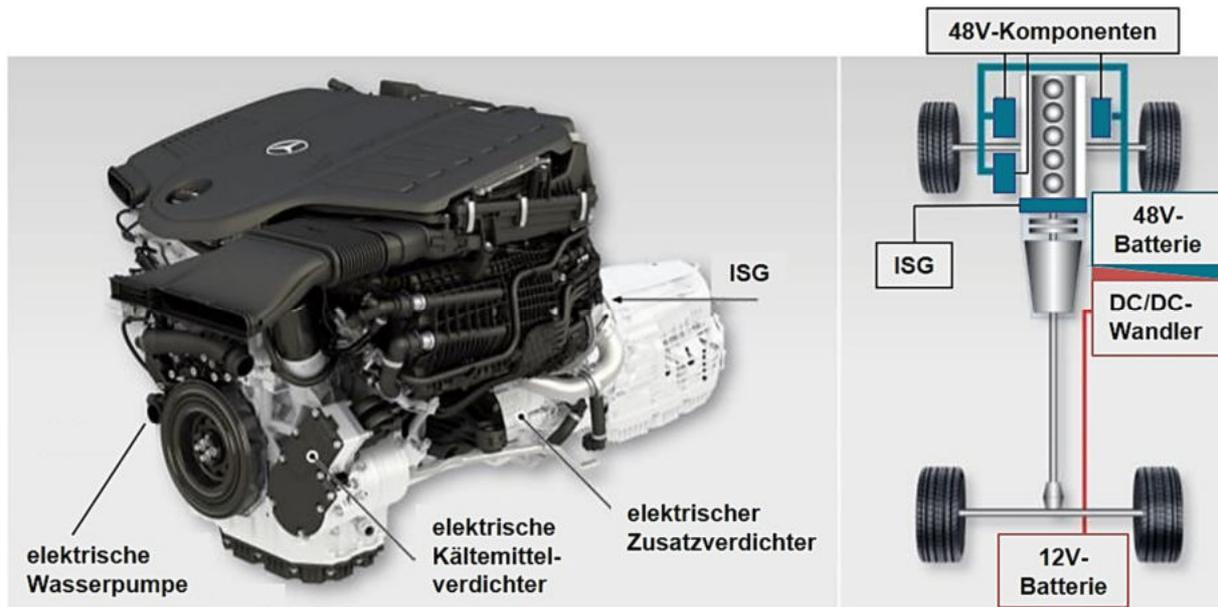


Abbildung 1-36: Antriebsaggregat mit 48V-Komponenten und schematische Darstellung vom P1-Mildhybridsystem [22]

Die integrierte Starter-Generator-Einheit übernimmt wie der RSG einige Hauptfunktionalitäten im Hybridantriebssystem. Einerseits wird diese zum Starten des Verbrennungsmotors verwendet und andererseits dient der ISG zum Aufladen der Batterie und versorgt dadurch die Verbraucher des 48-Volt-Bordnetzes mit elektrischer Energie. Weiterhin werden Hybridfunktionen wie Boosten, Rekuperieren sowie Lastpunktverschiebung vom ISG umgesetzt und ermöglicht dadurch Kraftstoff- und Emissionseinsparungen. [22]

Zur Unterstützung des Abgasturboladers kommt vor allem in niedrigen Drehzahlbereichen ein elektrischer Zusatzverdichter zum Einsatz. Im Vergleich zu einem Riemen-Starter-Generator ermöglicht ein integrierter Starter-Generator ein sehr schnelles Ansprechverhalten. Damit kann die elektrische Maschine hervorragend im Anfahr- und Beschleunigungsbetrieb verwendet werden und ergänzt so optimal die Antriebsleistung des Hybridfahrzeugs. Dadurch, dass die elektrische Maschine direkt auf der Kurbelwelle sitzt, können Drehungleichförmigkeiten ausgeglichen werden. Des Weiteren ermöglicht der ISG eine präzise Positionierung der Kurbelwelle bei Motorstopp, welche für einen effizienten Wiederstart des Verbrennungsmotors erforderlich ist. [22]

In Abbildung 1-37 ist nochmals das ausgeführte Antriebsaggregat mit Ansicht auf den im Kurbelgehäuse integrierten Starter-Generator dargestellt. [22]

Rein elektrisches Fahren ist mit einem integrierten Starter-Generator in der Regel nur über eine kurze Strecke möglich. Aufgrund der direkten Kopplung der elektrischen Maschine mit der Kurbelwelle muss auch das Schleppmoment des abgestellten Verbrennungsmotors überwunden werden. Deshalb kann auch bei einer Rekuperation nicht das volle Potential ausgeschöpft werden. Durch Zylinderabschaltung in dieser Betriebsart kann das Schleppmoment verringert werden, effizienter rekuperiert werden, sowie elektrisches Fahren ermöglicht werden. Auch mit dieser Antriebsstrangkonfiguration mit P1-Anordnung kann das Fahrzeug den Segelmodus nutzen, um Kraftstoff einzusparen, wenn der Verbrennungsmotor nicht benötigt wird. [23]

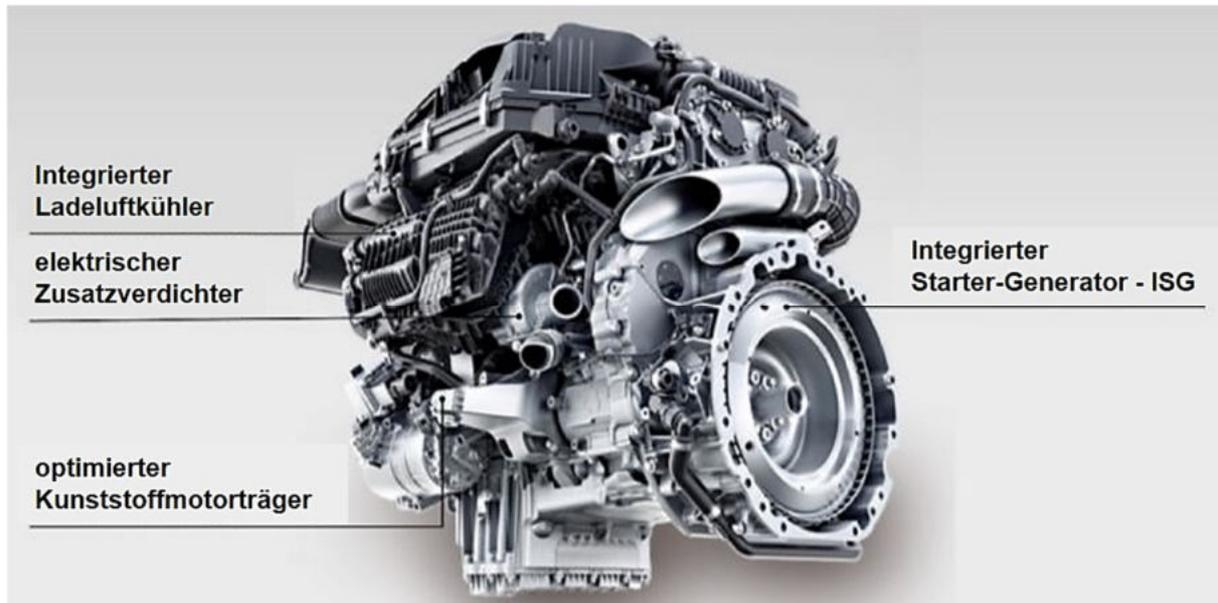


Abbildung 1-37: Ausführungsbeispiel eines 48-Volt-Mildhybridsystem mit ISG vom Mercedes M256 [23]

Nachteilig zu betrachten ist, dass wesentliche mechanische Änderungen von konventionellen Systemen erforderlich sind und die coaxiale Integration auf der Kurbelwelle zu einer Verlängerung des Antriebsstrangs führt. Um dennoch die Baulänge beizubehalten, kann der ISG auch achsparallel neben dem Verbrennungsmotor positioniert und über eine Untersetzungsstufe eingebunden werden. Dadurch, dass wegen der Untersetzung die elektrische Maschine eine höhere Drehzahl erreicht, kann der ISG kompakter ausgelegt werden. [23]

Das Hauptaugenmerk liegt bei allen Mild-Hybrid Ausführungen nicht auf dem rein elektrischen Fahrbetrieb, sondern auf der Unterstützung des Fahrantriebs sowie dem Antrieb der Nebenaggregate. So ermöglichen Mild-Hybride bereits mit 48-Volt Technologie auch die Energieversorgung von leistungsstärkeren elektrischen Verbrauchern wie beispielsweise Zusatzverdichter oder Fahrdynamiksysteme. Abhängig von der Fahrweise können Mild-Hybridantriebssysteme zu einer Verbrauchs- und Emissionsminderung beitragen. Allerdings kann bei längerer konstanter Fahrt und voll aufgeladener Batterie das Potential dieser Ausführung nicht vollständig ausgeschöpft werden. Erst bei transientem Fahrbetrieb können die vorteilhaften Funktionen gut genutzt. Startergeneratoren, sowohl riemengetrieben als auch auf der Kurbelwelle integriert, können kostengünstig den Bereich zwischen einfachen Start-Stopp-Systemen und Vollhybridfahrzeugen schließen, speziell wenn diese mit 48-Volt-Bordnetz verwendet werden. [23]

Full-Hybrid-Architekturen

Voll-Hybridantriebssysteme weisen im Vergleich zu Mild-Hybridsystemen höhere Bordnetzspannungen auf und ermöglichen dadurch den Einsatz von leistungsstärkeren Komponenten im Antriebsstrang. Um den Kraftstoff- sowie Emissionsausstoß weiter zu senken, werden Voll-Hybridsysteme bei PKW mit parallelem oder leistungsverzweigtem Energiefluss realisiert.

Eine Möglichkeit für ein parallel ausgeführtes Hybridsystem ist die Positionierung der elektrischen Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe. Wobei die VKM durch eine Trennkupplung von der E-Maschine abgekoppelt werden kann. Diese Anordnung kennzeichnet eine P2-Konfiguration und wird aufgrund der dadurch möglichen Funktionalitäten sehr häufig bei Hybridantrieben angewandt. Durch die vorteilhafte Entkopplung des Verbrennungsmotors von der elektrischen Maschine kann in bestimmten Fahrzuständen die Verlustleistung gesenkt werden. Im Vergleich zu einer P1-Konfiguration kann daher aufgrund der vollständigen Vermeidung der Motorschleppmomente effizienter rekuperiert sowie rein elektrisch gefahren werden. Außerdem kann mit dieser Anordnung der E-Maschine auf der Getriebeeingangswelle in Kombination mit einer erhöhten elektrischen Leistung, der Segelmodus durch Unterstützung vom Elektromotor effizienter genutzt werden. [7]

Die elektrische Maschine dient in diesem Fahrzustand bei abgekoppelter VKM ausschließlich zur Überwindung der Fahrwiderstände. Im Hybridbetrieb müssen beide Antriebsmaschinen allerdings den gleichen Drehmomentpfad durch das Getriebe nutzen. Die E-Maschine kann mit weniger Übersetzungsstufen in allen Fahrsituationen mit hoher Effizienz betrieben werden und bevorzugt eine größere Getriebeübersetzung. Der Verbrennungsmotor hingegen benötigt aber eine kleinere Übersetzung des Getriebes mit vielen Übersetzungsstufen, um für alle Fahrsituationen den dafür optimalen Betriebspunkt einzustellen. Eine weitere Einschränkung könnte bei der P2-Konfiguration sein, dass mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad der Platzbedarf der elektrischen Maschine am Getriebeeingang steigt. Insbesondere bei einem quer eingebauten Verbrennungsmotor und Getriebe kann dies eine konstruktive Einschränkung der Gesamteinheit bedeuten. [7]

Abbildung 1-38 zeigt eine ausgeführte Fahrzeugarchitektur eines Voll-Hybridantriebssystem in P2-Konfiguration. Die dabei eingesetzte elektrische Maschine ist am Getriebeeingang positioniert und ist mit einer Leistung von 40 kW ausgelegt. Um beide Achsen anzutreiben, wird ein modifiziertes Automatikgetriebe mit acht Übersetzungsstufen eingesetzt. Die elektrische Antriebseinheit ersetzt dabei den hydrodynamischen Wandler und ist in der Getriebeglocke angeordnet. Bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor versorgt eine elektrische Ölpumpe das hydraulische System, um die Start-Stopp-Funktion ausführen zu können. Das unter dem Ladeboden im Heckbereich positionierte Hochvolt-Batteriesystem basiert auf der Lithium-Ionen-Technologie und dient als Energiespeicher für den Elektromotor sowie von bestimmten Nebenaggregaten. Über das Batterie-Kühlmodul erfolgt je nach Anforderung die Kühlung des Batteriesystems auf zwei Arten mit Luft. Durch ein Gebläse kann bei niedriger thermischer Belastung temperierte Luft aus dem Innenraum des Fahrzeugs bezogen werden. Bei Überschreitung einer definierten Temperatur erfolgt die Wärmeabfuhr über einen eigenen Kältekreislauf, welcher an die Klimaautomatik vom Fahrzeug angeschlossen ist. [7]

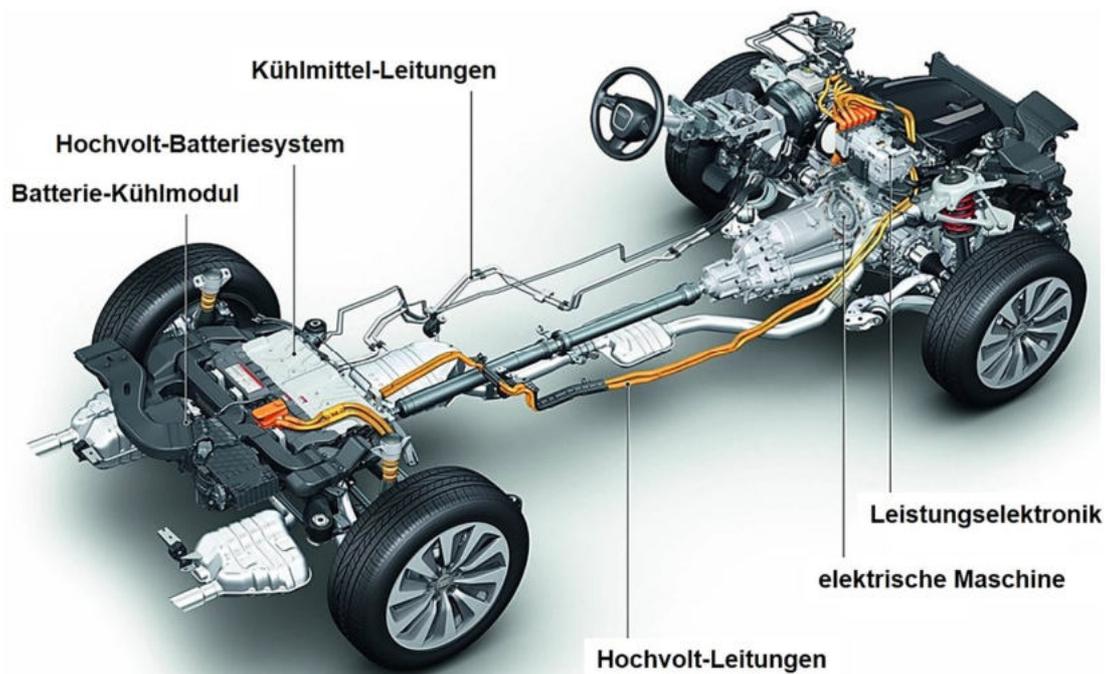


Abbildung 1-38: Architektur eines Voll-Hybridantriebssystems in P2-Anordnung – Beispiel Audi Q5 Hybrid quattro [7] [24]

In Abbildung 1-39 ist der Aufbau dieses Hybridmoduls dargestellt, welches zwischen Verbrennungsmotor und Getriebeeingang positioniert ist. Als elektrische Maschine kommt eine permanenterregte Synchronmaschine zum Einsatz. Die zur Ansteuerung benötigte Leistungselektronik ist direkt an der E-Maschine angebracht. In dieser kompakten Einheit sind der Inverter sowie der Gleichspannungswandler untergebracht. Diese Einheit ist zur Wärmeabfuhr mit einem eigenen Niedertemperaturkreislauf ausgestattet. Der Elektromotor ist dabei mit einer im Ölbad laufenden Lamellenkupplung verbunden. Diese sorgt für die Verbindung beziehungsweise Trennung zwischen E-Maschine und Verbrennungsmotor. Um Drehungleichförmigkeit der VKM auszugleichen, ist ein Torsionsschwingungsdämpfer im Hybridmodul integriert. Zur Einhaltung der zulässigen Betriebstemperatur wird die E-Maschine über den Kühlwasserkreislauf des Verbrennungsmotors flüssigkeitsgekühlt. [7]

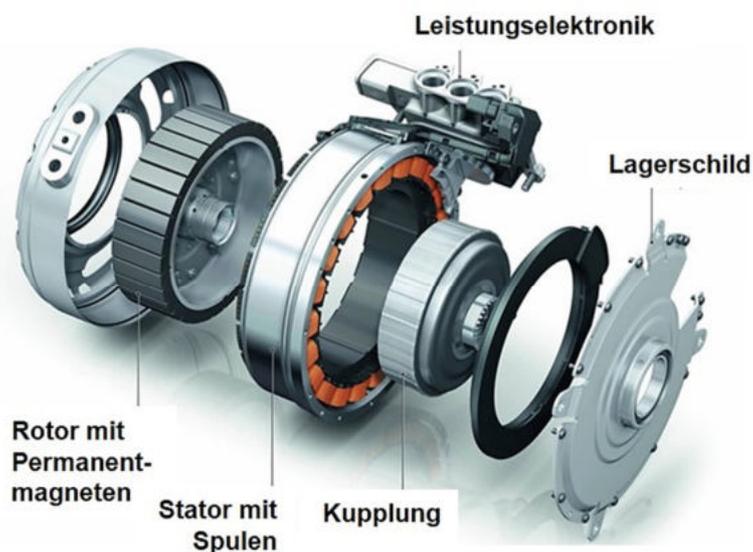


Abbildung 1-39: Aufbau des Hybridmoduls mit Komponenten – Beispiel Audi Q5 Hybrid quattro [7] [24]

Neben den Grundfunktionen wie Boosten, Rekuperieren sowie rein elektrisches Fahren können noch einige zusätzliche Nebenfunktionen umgesetzt werden. Im Generatormodus kann die elektrische Maschine eine zusätzliche Motorlast zur Lastpunktverschiebung generieren. In Fahrsituation bei denen der VKM nicht zwingend benötigt wird, kann dieser abgekoppelt und abgestellt werden. Durch Drehmomenteingriffe der E-Maschine kann der Schaltvorgang komfortabel gestaltet und dadurch unterstützt werden. Die rein elektrische Fahrreichweite ist dabei eher gering und beträgt bei diesem Fahrzeug unter 3 km. Insbesondere im Stadtbetrieb kann der Kraftstoffverbrauch durch diese Hybridisierung gesenkt werden. [7]

Eine weitere Möglichkeit für ein paralleles Vollhybridsystem ist die Ausführung mit Zugkraftaddition. Ein solcher achsgeteilter Hybrid entspricht einer P4-Konfiguration und ermöglicht das Zusammenführen von Leistungen mittels Traktion auf der Fahrbahn. Das Hybridantriebssystem setzt sich aus einer elektrisch angetriebenen Achse sowie einer durch einen Verbrennungsmotor angetriebenen Achse zusammen. Die Integration des jeweiligen Antriebsaggregats kann wahlweise an der Vorder- oder Hinterachse erfolgen. Die Antriebsleistungen können dabei je nach Bedarf auf die entsprechenden Achsen aufgeteilt werden. [7]

In Abbildung 1-40 ist die Fahrzeugarchitektur von einem achsgeteilten Vollhybridfahrzeug dargestellt. Der Antrieb an der Vorderachse erfolgt mit einem Dieselmotor. Die Hinterachse wird elektrisch angetrieben.

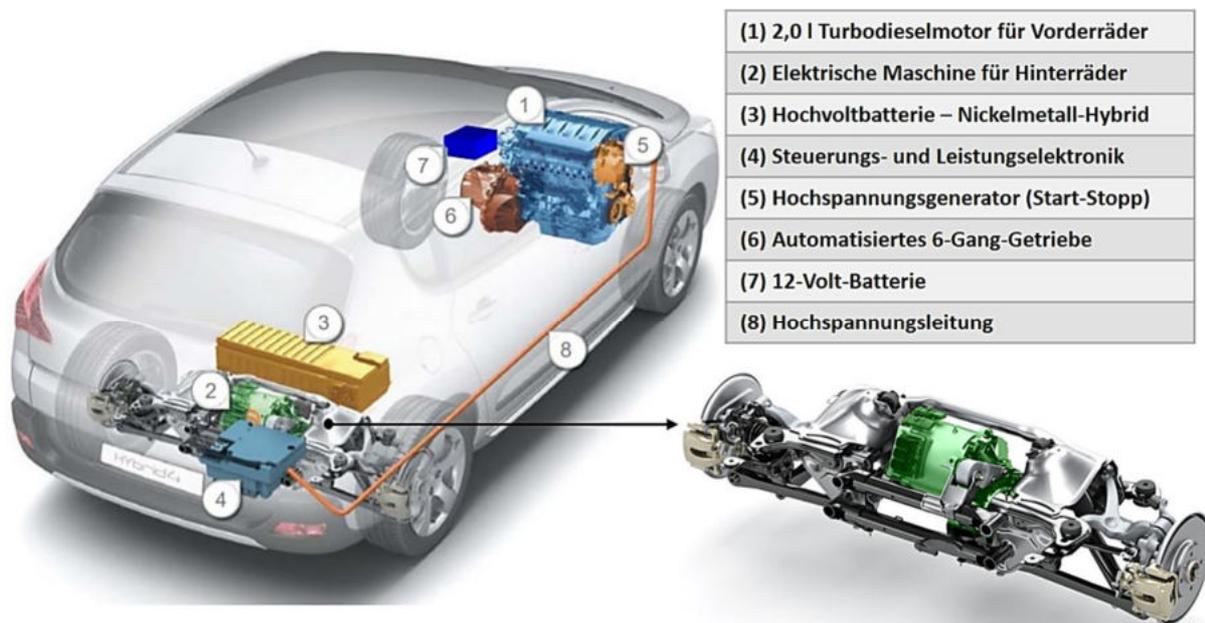


Abbildung 1-40: Architektur eines Voll-Hybridantriebssystem in P4-Anordnung – Beispiel Peugeot 3008 Hybrid4 [25] [26]

Neben Kraftstoffeinsparungen in bestimmten Fahrsituationen bietet das Antriebssystem alle typischen Grundfunktionen wie elektrisches Fahren, Allradantrieb sowie Schalten ohne Zugkraftunterbrechung. Als primäre Antriebseinheit dient ein Dieselmotor mit einer Leistung von 120 kW, welcher die Vorderräder antreibt. Der Verbrennungsmotor wird mit einem 8,5 kW starken Riemen-Starter-Generator (RSG) verknüpft, um eine komfortable und rasche Start-Stopp-Funktion zu ermöglichen. Im Generatorbetrieb stellt der RSG stetig elektrische Energie für das Hochvoltbordnetz zur Verfügung. Gleichzeitig kann der Riemen-Starter-Generator eine zusätzliche Last zur Lastpunktverschiebung für den Dieselmotor generieren. Außerdem kann der Hochspannungsgenerator permanent und ohne

Umwege die erforderliche Energie für die elektrische Hinterachse für den Allradbetrieb zur Verfügung stellen. Über einen Gleichspannungswandler wird elektrische Leistung für alle Niedervoltverbraucher bereitgestellt. [7]

Das vom Verbrennungsmotor generierte Drehmoment wird über ein automatisiertes 6-Gang-Getriebe an die vorderen Antriebsräder übertragen. Im rein elektrischen Fahrbetrieb erfolgt die Schaltung auf den Leerlauf, die Kupplung wird anschließend geöffnet und der Dieselmotor abgestellt. Im Segelmodus kann das Fahrzeug mit oder ohne Unterstützung der elektrifizierten Hinterachse betrieben werden. [7]

Die elektrische Maschine zum Antrieb der hinteren Räder liefert eine maximale Leistung von 27 kW und ist dabei kompakt in die Hinterachse integriert. Die E-Maschine ermöglicht dadurch ein problemloses Anfahren am Berg sowie ein sportliches Beschleunigungsverhalten. Eine Übersetzungsstufe, welche an die Heckmaschine gekoppelt ist, sorgt vor allem im Stadtbetrieb für gute Beschleunigungswerte. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten wird zur Vermeidung von Leistungsverlusten die E-Maschine durch eine Klauenkupplung vom Getriebe und somit vom Antriebsstrang abgekoppelt. Ein abgestimmtes Zusammenspiel der beiden Antriebsdrehmomente ist für die Ein- und Auskuppelfunktion zwingend erforderlich, um unterbrechungs- sowie stoßfreie Beschleunigungen zu erhalten. Für den Betrieb der beiden elektrischen Maschinen an der Vorder- und Hinterachse wird ein kompakter Doppel-Umrichter eingesetzt. Zur Versorgung des Niedervoltbordnetzes ist der Gleichspannungswandler im gleichen Gehäuse integriert. Die Steuerungselektronik ist für die gesamten Regelungs- und Sicherheitsfunktionen für das Hybrid-Antriebssystem erforderlich. [7]

Das Hochvoltbatteriesystem basiert auf der Nickel-Metallhydrid-Technologie und arbeitet auf einem Spannungsniveau zwischen 150 und 270 Volt. Das Batteriesystem ist für eine maximale Leistung von 31 kW ausgelegt und ermöglicht dadurch die Boost-Funktion sowie die Rückgewinnung der kinetischen Energie in Verzögerungsphasen. Mit dem Energieinhalt des Batteriesystems kann eine rein elektrische Fahrdistanz von bis zu 4 km bei 60 km/h zurückgelegt werden. Durch Rekuperation kann mithilfe der hinteren elektrischen Maschine im Generatormodus die Hochvoltbatterie innerhalb weniger Minuten bei einem längeren Gefälle wieder aufgeladen werden. Die Batterie ist hinter der Rücksitzbank und über der Hinterachse kompakt positioniert. Um das Batteriesystem mit bestmöglicher Effizienz zu betreiben, wird es zur Wärmeabfuhr mit vorkonditionierter Luft aus der Fahrerkabine gekühlt. [7]

Die Besonderheit von einem Hybridantriebssystem mit P4-Konfiguration ist die Verwendung der Allradfunktion. Neben der Traktionsunterstützung kann in Hinblick auf die Fahrdynamik ein aktiver Drehmoment-Eingriff erfolgen, um ein gewünschtes Handling des Fahrzeugs zu erzeugen, z.B. übersteuernde Drift-Modus oder untersteuernde Fahrzeugstabilisierung. [7]

Aufgrund der begrenzten Batteriekapazität wird ein Anteil der Leistung des Verbrennungsmotors vom vorderen Hochspannungsgenerator verwendet, um die elektrische Energie für den Heckmotor umzuwandeln. Auf diese Weise kann die Allradfunktion kontinuierlich dargestellt werden. Das Hochvoltbatteriesystem wird bei Bedarf dazu verwendet, um Leistungsspitzen abzudecken. Außerdem ermöglicht der Dieselmotor bei permanenten Leistungsfluss die Aufrechterhaltung des Ladezustands der Batterie. [7]

Bei rein elektrischem Fahrbetrieb erfolgt die Energieversorgung des elektrifizierten Hinterachsantriebs lediglich durch die Hochspannungsbatterie. Wenn die Betriebs- sowie Fahrsituation es erlaubt, wird der elektrische Fahrmodus in Abhängigkeit vom Batterieladestatus automatisch aktiviert. Durch den automatischen Wechsel zwischen elektrischem Fahr- und Lademodus können zusätzliche Verbrauchseinsparung erzielt werden. Ein besonderes Merkmal der elektrifizierten Hinterachse ist ihre Fähigkeit, Drehmomentabfälle beim Schalten des automatisierten Schaltgetriebes zu kompensieren. Um diese Funktion umsetzen zu können, ist eine gezielte Steuerung der Drehmomente sowie eine gute Synchronisation zwischen der Kupplung des automatisierten Schaltgetriebes und dem elektrischen Heckmotor erforderlich. Dadurch ist es möglich, während des Schaltvorgangs eine nahezu konstante Beschleunigung zu erreichen. [7]

Die Ausführung eines Vollhybridfahrzeugs mit einer leistungsverzweigten Architektur stellt eine weitere Möglichkeit dar, um den Kraftstoffverbrauch zu senken. Das wohl bekannteste leistungsverzweigte Hybridfahrzeug mit Markteinführung im Jahr 1997 ist das von Toyota produzierte Prius-Modell. Mittlerweile ist der Prius mit seiner vierten Generation in den Markt eingeführt und auch als Plug-In-Variante erhältlich. Die Besonderheit am Toyota Prius ist sein völlig neu entwickeltes Hybridantriebssystem. Andere Serienfahrzeuge mit paralleler Hybridstruktur basieren zumeist auf einem konventionellen Antriebsstrang. Im leistungsverzweigten System vom Toyota Prius ist ein 4-Zylinder-Ottomotor mit einer maximalen Leistung von 72 kW und zwei elektrische Maschinen um ein Planetengetriebe angeordnet. Des Weiteren sind eine Hochleistungsbatterie sowie eine Leistungselektronik im Antriebssystem integriert. In Abbildung 1-41 ist der Antriebsstrang vom leistungsverzweigten Toyota Prius IV mit seinen Komponenten dargestellt. [7]

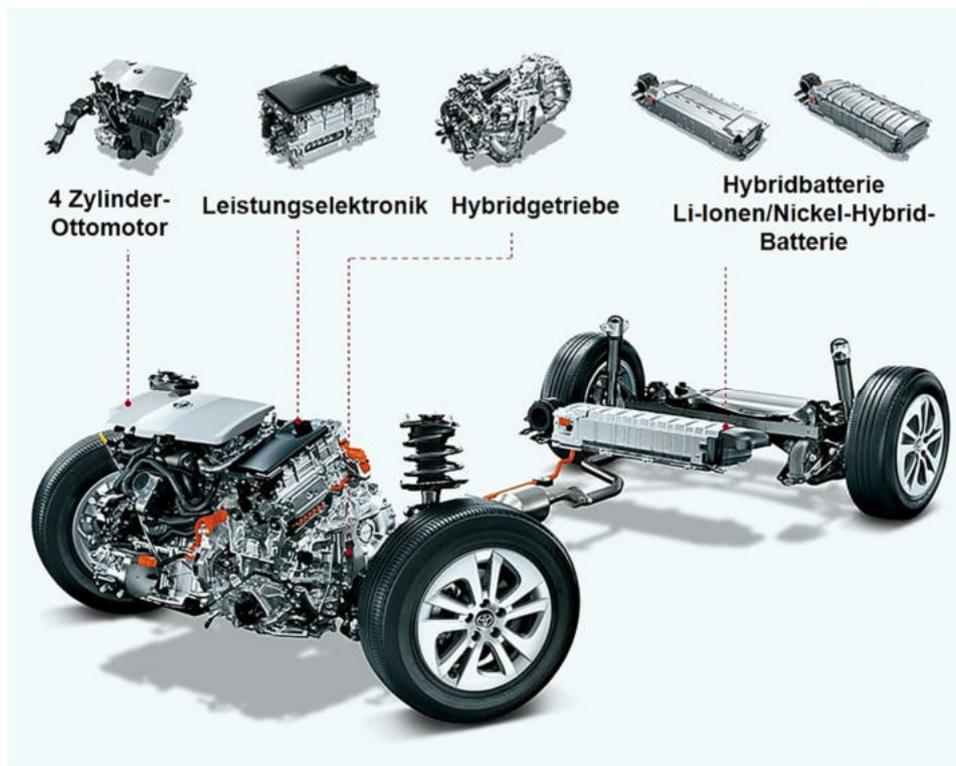


Abbildung 1-41: Antriebsstrang eines leistungsverzweigten Vollhybridfahrzeugs – Beispiel Toyota Prius IV [27]

Das Hochleistungsbatteriesystem basiert auf der Nickel-Metallhydrid-Technologie und arbeitet bei einer mittleren Spannungslage von 202 Volt. Die Systemleistung beträgt 90 kW (122 PS) und ermöglicht rein elektrisches Fahren, Beschleunigungsunterstützung sowie die Rückgewinnung der kinetischen Energie in Verzögerungsphasen. Die VKM verfügt über eine Leistung von 72 kW und die maximale Leistung des E-Motors beträgt 53 kW. Untergebracht ist die Batterie im Heckbereich des Fahrzeugs unter der Rücksitzbank. Um das Batteriesystem mit bestmöglicher Effizienz zu betreiben, wird die Batterie mit Luft gekühlt. Außerdem versorgt der Hochspannungskreis über einen DC/DC-Wandler, welcher in der Leistungselektronik untergebracht ist, das 12-V-Bordnetz. Der Toyota Prius mit externer Nachlademöglichkeit (Plug-In) ist mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet, weil diese eine höhere Energiedichte aufweist als die Nickel-Metallhydrid-Batterie. [7]

Der Verbrennungsmotor ist speziell für den Einsatz im Hybridfahrzeug entwickelt und von Toyota über alle 4 Generationen kontinuierlich überarbeitet und verbessert worden. Der 4-Zylinder-Ottomotor verfügt über ein hohes geometrisches Verdichtungsverhältnis und arbeitet nach dem Atkinson-Zyklus. Das hohe Verdichtungsverhältnis ermöglicht Verbrauchsvorteile vor allem im Teillastbereich. Bei erhöhten Motorlasten verringert sich allerdings der Wirkungsgrad und das erreichbare Drehmoment sinkt aufgrund des Klopfproblems von Ottomotoren. Um dies zu kompensieren, wird der Atkinson-Zyklus eingesetzt. Dieser Zyklus ist dadurch charakterisiert, dass sich die Einlassventile erst sehr spät schließen und demnach der Verdichtungshub später und nicht im unteren Totpunkt des Kolbens beginnt. Beim Atkinson-Zyklus kann der Beginn des Verdichtungstakts bestmöglich an die Betriebsbedingungen des Ottomotors angepasst werden. Zur Umsetzung ist eine intelligente Steuerung der Öffnungs- und Schließzeitpunkte des Einlassventils durch Nockenwellenverstellung erforderlich. Ein Teil der Zylinderladung wird durch das noch offene Einlassventil wieder ausgeschoben und verringert damit das effektive Verdichtungsverhältnis. Die Kompression beginnt somit erst, wenn sich das Einlassventil schließt. [27]

Der Ottomotor erreicht einen hohen maximale thermischen Wirkungsgrad von 40 Prozent. Unter anderem durch den Einsatz eines großvolumigen Abgasrückführungssystems sowie durch verbesserte Verbrennungseffizienz und Klopfregelung wird dieser Wirkungsgrad ermöglicht. Um die Reibung zwischen gleitenden Komponenten zu verringern, kommt ein dünnflüssiges Öl zum Einsatz. Durch Elektrifizierung aller Nebenaggregate ist der Ottomotor ohne Riementrieb ausgeführt, wodurch geringere Reibungsverluste auftreten. [7]

Abbildung 1-42 zeigt das ausgeführte Antriebssystem mit Schnitt durch das elektrisch leistungsverzweigte Hybridgetriebe, siehe auch Abschnitt „6.1.3.2.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb“. Um Drehungleichförmigkeiten auszugleichen, ist der 4-Zylinder-Ottomotor über einen Torsionsschwingungsdämpfer direkt mit dem Steg des Planetengetriebes verbunden. Die mechanische Antriebsleistung der VKM wird dabei im Planetengetriebe je nach Betriebszustand und Fahrsituation in einen mechanischen Anteil (Hohlrad) sowie in einen elektrischen Anteil (Sonnenrad) aufgeteilt. Der Motor-Generator 1 sitzt am Sonnenrad, welches konstruktiv als Hohlwelle ausgeführt ist. Neben der Startfunktion für den Verbrennungsmotor versorgt der MG1 den Motor-Generator 2 sowie das Batteriesystem mit elektrischer Energie. Somit wird die konventionelle Lichtmaschine vom Antriebssystem entfernt. Der MG2 greift über eine Stirnrad-Untersetzungsstufe an der Hohlradaußenverzahnung an, welcher die mechanische Antriebsleistung beim rein elektrischen- sowie Rückwärts-Fahren zur Verfügung stellt. Insgesamt sind vier Planetenräder gleichzeitig mit Innenverzahnung des Hohlrads und der Sonnenradverzahnung im Eingriff. Des Weiteren wird der MG2 mit seiner maximalen Leistung von 53 kW zur Unterstützung beim Beschleunigungsvorgang verwendet

sowie zur Rückgewinnung der kinetischen Energie in Verzögerungsphasen, um die elektrische Energie in die Hochvoltbatterie einzuspeisen. Das Hohlrad des Planetengetriebes ist über zwei Stirnradstufen mit dem Abtrieb gekoppelt und befindet sich außer bei stehendem Fahrzeug somit immer in Drehbewegung. Die Drehzahl des Hohlrads ist somit immer proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit. [7]

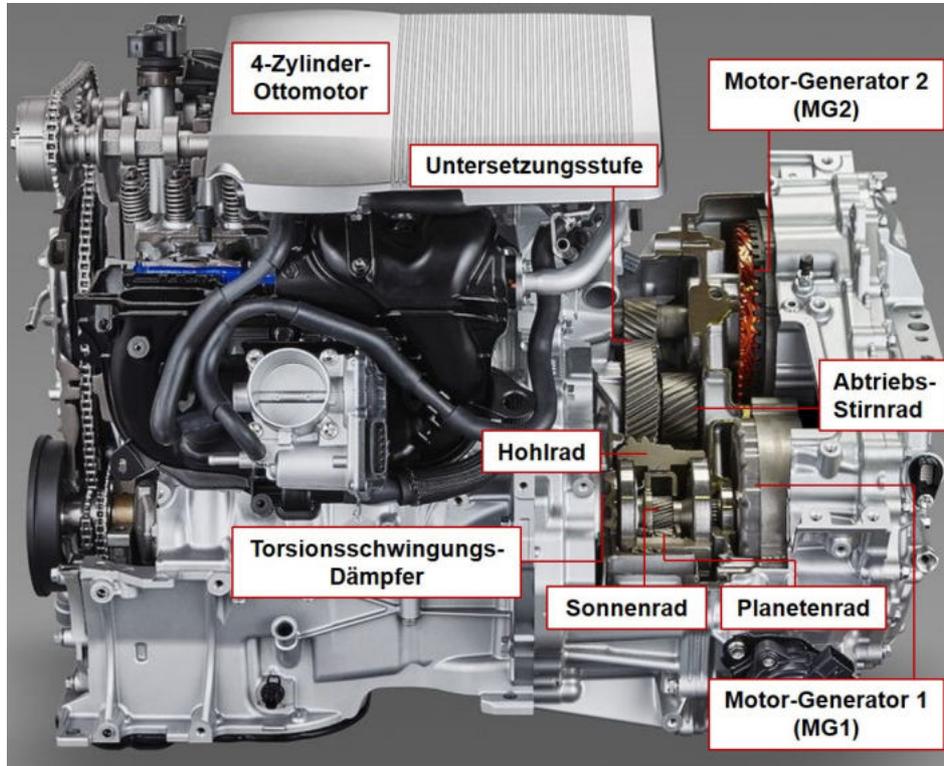


Abbildung 1-42: Ausgeführtes Antriebssystem mit Hybridgetriebe vom Toyota Prius IV [28]

Um ein höheres Drehmoment aus dem Elektromotor MG2 herauszuholen, ist eine Untersetzungsstufe im System eingebaut. Neben der Drehmomenterhöhung kann dadurch eine kompakte Bauweise des E-Motors mit geringer Länge erreicht werden. Das im Eingriff befindliche Zahnrad dieser Untersetzungsstufe wird dabei mit Drehmomenten von MG2 sowie von der VKM in Kombination mit MG1 beaufschlagt. Dieses resultierende Drehmoment wird wiederum über eine weitere Stirnraduntersetzungsstufe mit Kegelraddifferenzial zu den Rädern geleitet. Als Parksperr dient eine auf der Hohlradaußenseite vorhandene Verzahnung. Zum Antrieb der Ölpumpe ist die dazu erforderliche Antriebswelle mit dem Planetenträger verbunden. Die rechts neben dem MG1 koaxial positionierte Ölpumpe arbeitet somit mit gleicher Drehzahl wie der Ottomotor. Der Verbrennungsmotor ist mechanisch nicht direkt zum Motor-Generator 2 verbunden, sodass dieser ebenso zur Antriebsunterstützung in bestimmten Fahrsituationen eingesetzt werden kann. [7] [27]

Der 4-Zylinder-Ottomotor treibt den Planetensteg des leistungsverzweigten Hybridgetriebes an. Beim rein elektrischen Fahren bringt ausschließlich der MG2 die Räder in Drehbewegung. Dadurch, dass bei diesem Fahrzustand der Verbrennungsmotor abgestellt ist, bewegt sich auch der Planetensteg nicht. Damit drehen sich das Sonnenrad, das Hohlrad, und somit der MG1, aber allerdings in anderer Drehrichtung als MG2. Der Motor-Generator 1 wird in dieser Phase zur Stromerzeugung als Generator genutzt, um Batterie und Bordnetz mit Energie zu versorgen. Aufgrund der Übersetzung dreht sich der MG2 mit einer höheren Drehzahl als der MG1. Das bedeutet rein elektrisches Fahren kann nur bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit erfolgen. Ist eine definierte Generatordrehzahl erreicht, wird das

elektrische Feld vom MG1 reduziert. Dem zu Folge beginnt sich der Planetensteg wieder zu drehen und startet den abgestellten Verbrennungsmotor zur Unterstützung. [7]

Diese Leistungsverzweigung durch das Planetengetriebe in Kombination mit den beiden elektrischen Maschinen ermöglicht eine stufenlos veränderliche Drehzahlanpassung zwischen Ottomotor und den Rädern. Dadurch kann die VKM, vergleichbar wie bei einem seriell ausgeführten Antriebssystem, so oft wie möglich im verbrauchsoptimalen Bereich arbeiten. Bei dieser leistungsverzweigten Architektur sind keine Anfahrkupplung sowie kein konventionelles Schaltgetriebe notwendig, da die Übersetzungsverhältnisse stufenlos eingestellt werden können. Diese Art eines Getriebes wird auch als elektrisches stufenloses Getriebe (e-CVT) bezeichnet. [7]

Plug-In-Hybrid-Architekturen

Das Hauptaugenmerk bei einem Plug-In-Antriebssystem liegt darauf, die rein elektrische Reichweite signifikant zu erhöhen und die dafür bereitgestellte elektrische Energie unabhängig vom Verbrennungsmotor und Bremsenergieerückgewinnung beziehen zu können.

In nachfolgender Abbildung 1-43 ist eine Fahrzeugarchitektur eines Kompaktfahrzeugs mit Plug-In-Technologie ersichtlich. Das dargestellte Antriebssystem ist mit paralleler Hybridstruktur in P2-Anordnung ausgeführt. Der Kraftstofftank ist zwischen den Schenkeln der Verbundlenker-Hinterachse im Fahrzeugheck integriert. Dadurch entsteht zusätzlicher Bauraum unter der Rücksitzbank. Dieses freie Volumen wird zur Unterbringung des Hochvolt-Batteriesystems genutzt. [29]

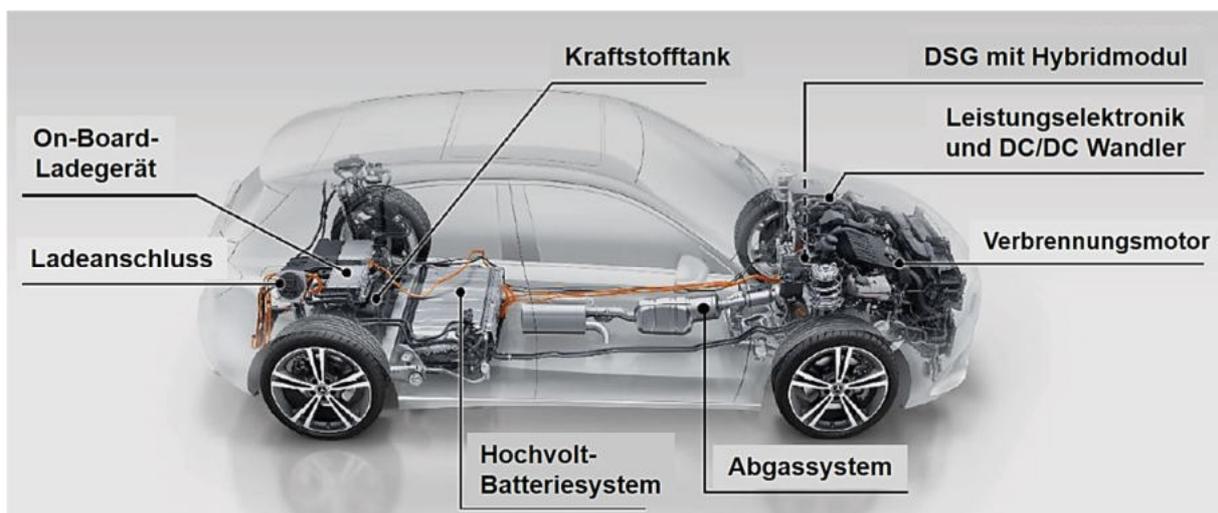


Abbildung 1-43: Fahrzeugarchitektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P2-Konfiguration – Beispiel Mercedes Kompaktklasse [29]

Die hohe Batteriekapazität des mitgeführten Energiespeichers kann je nach Betriebsbedingungen eine elektrische Fahrdistanz von bis zu 60 km ermöglichen. Ein modifiziertes Abgassystem benötigt im Vergleich zu einem konventionellen System nur mehr die Hälfte der Baulänge im Fahrzeugtunnel. So kann der zur Verfügung stehende Platz im Heckbereich bestmöglich für das On-Board-Ladegerät sowie für das Kofferraumvolumen genutzt werden. Als Verbrennungsmotor dient ein Vier-Zylinder-Ottomotor, welcher quer eingebaut ist. Die P2-Hybridstruktur wird in Verbindung mit einem Doppelkupplungsgetriebe realisiert, welches ebenso in den front-quer Antriebsstrang integriert ist.

In Abbildung 1-44 ist das kompakte Achtgang-Doppelkupplungsgetriebe mit integriertem Hybridmodul dargestellt. Eine große Herausforderung bei der Umsetzung der P2-Hybridstruktur in Kombination mit einem Doppelkupplungsgetriebe ist, insbesondere bei kleinen Kompaktfahrzeugen, die Integration in den verfügbaren axialen Bauraum. Das Hybridmodul ist koaxial zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe untergebracht. Das Hybridmodul besteht aus einer elektrischen Maschine, einer Doppelkupplung zur Weiterleitung der Drehmomente in den jeweiligen Schaltstrang und einer Trennkupplung zur Entkopplung von E-Maschine und VKM. [29]

Das Doppelkupplungsgetriebe unterbindet Schaltpausen, da es aus zwei ineinander liegenden Schaltsträngen besteht. Wenn ein Gang eingelegt ist, kann bereits je nach Fahrsituation der nächste Gang vorgewählt werden, der sich vorerst noch im Leerlauf bei geöffneter Kupplung befindet. Durch überlappendes Öffnen beziehungsweise Schließen der beiden Kupplungen kann ein Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung durchgeführt werden. Die nasslaufende Trennkupplung ist im Rotor der elektrischen Maschine untergebracht. Die Doppelkupplung ist in Form zweier in Öl nasslaufenden Lamellenkupplungen realisiert. Dadurch kann einerseits die thermische Belastung gesenkt werden und andererseits ein schnelles und exaktes Schaltverhalten realisiert werden. Dadurch können auch deutlich gesteigerte Anhängerlasten bewegt werden. [7] [29]

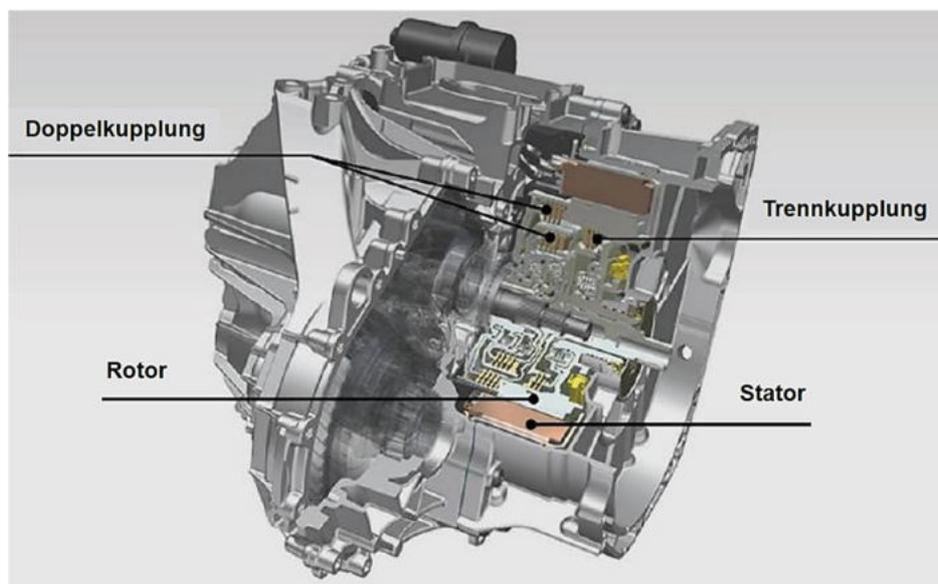


Abbildung 1-44: Achtgang-Doppelkupplungsgetriebe mit integriertem Hybridmodul [29]

Bei Stadtgeländewagen mit erhöhter Bodenfreiheit (SUV) sowie bei Limousinen-Fahrzeugen findet die Plug-In-Technologie ebenso häufig Anwendung. Dazu ist eine weitere Fahrzeugarchitektur in nachfolgender Abbildung 1-45 ersichtlich. Das Hybridmodul ist wiederum in P2-Konfiguration und in Kombination mit einem Automatikgetriebe im Antriebssystem integriert. Das nach dem Automatikgetriebe angeordnete Verteilergetriebe, dient zur Verteilung des Drehmoments an Vorder- und Hinterachse. Als Hauptantriebsquelle kommt ein Vier-Zylinder-Ottomotor zum Einsatz. Die auf der Hinterachse angeordnete Hochvolt-Batterie basiert auf der Lithium-Ionen-Technologie und ermöglicht rein elektrische Reichweiten von bis zu 30 km. Aufgrund des höheren Gesamtgewichts eines SUV-Fahrzeugs sind die erreichbaren elektrischen Reichweiten bei gleicher Batteriekapazität geringer im Vergleich zu einem Kompaktfahrzeug. Zur Leistungsversorgung der Niedervoltverbraucher ist im

Heckbereich des Fahrzeugs die konventionelle 12-Volt-Batterie untergebracht. Diese wird über den Gleichspannungswandler vom Hochvoltbordnetz mit Energie versorgt. Das zur externen Nachladung erforderliche Ladegerät, ist bei dieser Plug-In-Architektur zentral im Fahrzeug positioniert. [31] [32]

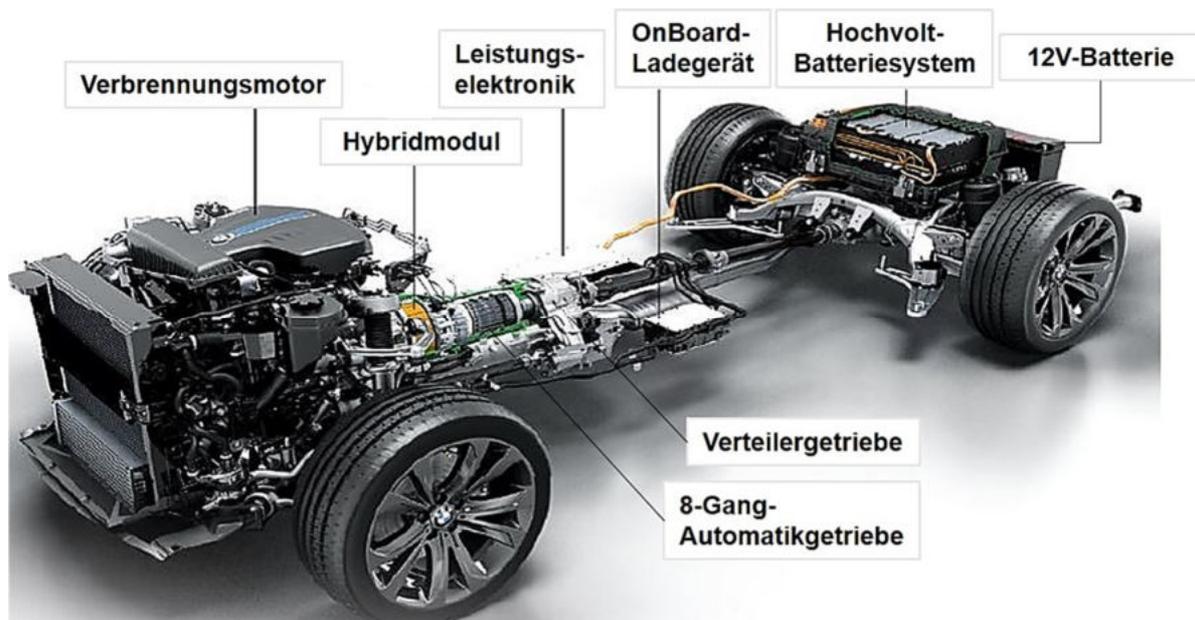


Abbildung 1-45: Architektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P2-Konfiguration – Beispiel BMW X5 eDrive [30]

In Abbildung 1-46 ist das Achtgang-Automatikgetriebe mit integriertem Hybridmodul dargestellt. In konventionellen Automatikgetrieben kommt ein in die Getriebeglocke integrierter hydrodynamischer Drehmomentwandler zum Einsatz. Bei der P2-Hybridisierung verschwindet dieser Wandler, sodass der freie Bauraum für das Hybridmodul genutzt werden kann, welches aus einer elektrischen Maschine mit Trennkupplung und einem Torsionsschwingungsdämpfersystem besteht. Dies bedeutet, dass zusätzlicher Bauraum für die Integration des Hybridmoduls nicht zwingend erforderlich ist. Sequenzielle Planetenradsätze, die permanent im Eingriff sind, schalten dabei ohne Unterbrechung die einzelnen Gänge über hydraulische Lamellenkupplungen. [31] [32]

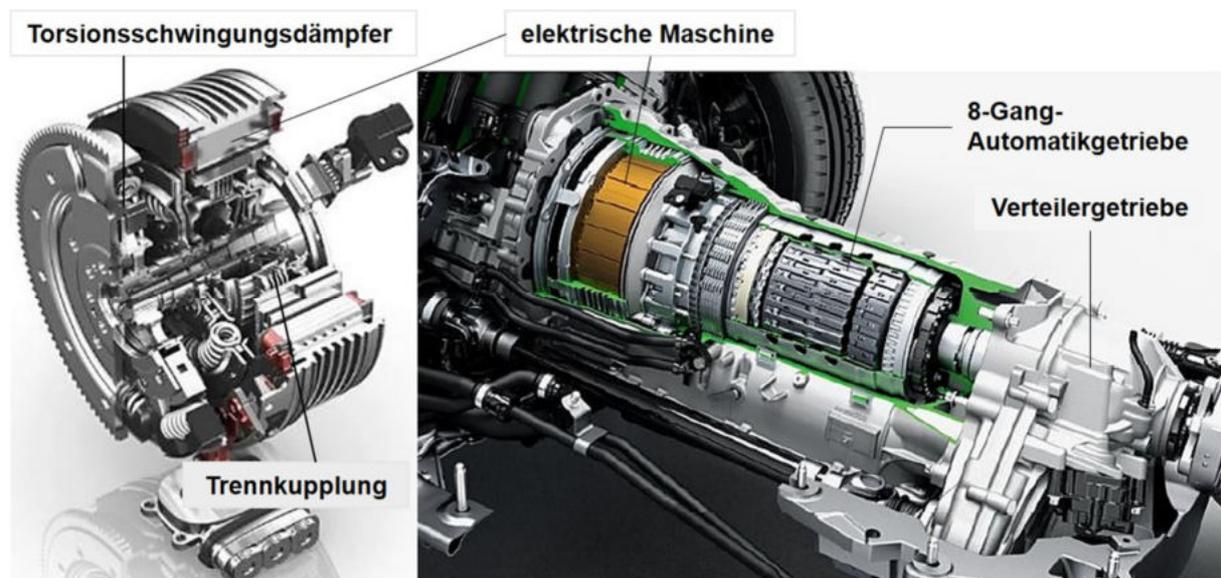


Abbildung 1-46: Acht-Gang-Automatikgetriebe mit integriertem Hybridmodul [30]

Die dabei eingesetzte elektrische Maschine ist als permanente Synchronmaschine ausgeführt, welche eine Spitzenleistung von 70 kW und ein maximales Drehmoment von 250 Nm erreicht. Durch den Wegfall des hydrodynamischen Drehmomentwandlers müssen dessen Aufgaben von anderen Komponenten übernommen werden. So wird für die Schwingungsentkopplung der Drehungleichförmigkeiten des Verbrennungsmotors ein eigenes Torsionsdämpfersystem mit zwei getrennten Dämpferstufen eingesetzt. Die Anfahrfunktion übernimmt eine bereits im Getriebe integrierte, nasslaufende Lamellenkupplung, welche an die erhöhten Anforderungen angepasst ist. Um das rein elektrische Fahren und somit die Entkopplung vom Verbrennungsmotor zu ermöglichen, ist eine automatisierte Motor-Trennkupplung im Hybridmodul integriert. Konzipiert als nasslaufende Lamellenkupplung mit kleinem Durchmesser, ist diese bauraumoptimiert im Innenbereich der elektrischen Maschine angeordnet. Um Schleppmomente im geöffneten Zustand zu reduzieren, werden neben einer schaltbaren Ölzufuhr spezielle Reibbeläge genutzt, wodurch die elektrische Fahrdistanz erhöht werden kann. [31] [32]

Zur Druckölversorgung des gesamten Getriebes wird eine elektrische Ölpumpe verwendet. So wird auch eine Versorgung bei abgestelltem Verbrennungsmotor gewährleistet. Um die resultierende Wärme der elektrischen Maschine abzuführen, wird sowohl eine Öl-Spritzkühlung des Rotors als auch eine Wasserkühlung an der Stator-Außenseite der E-Maschine umgesetzt. Die Ölkühlung ist dabei in den Ölkreislauf des Getriebes eingebunden. Das Automatikgetriebe mit integriertem Hybridmodul ermöglicht durch Unterstützung der elektrischen Maschine einen hohen Fahrkomfort ohne Zugkraftunterbrechung. Der leistungsstarke Elektromotor bietet in diesem Antriebssystem somit ein sehr dynamisches Fahrverhalten in allen Fahrsituationen. [31] [32]

Eine weitere parallele Hybridstruktur mit Plug-In-Technologie ist ein Antriebssystem mit P3-Konfiguration der elektrischen Maschine. Abbildung 1-47 zeigt eine Plug-In-Hybridarchitektur in P3-Anordnung der E-Maschine im Antriebsstrang.

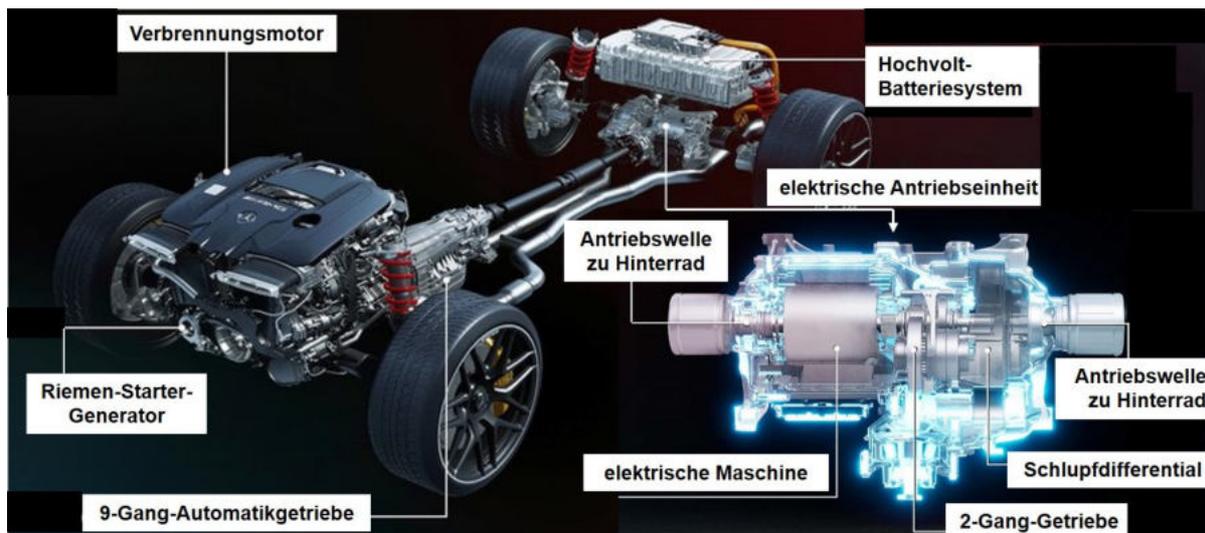


Abbildung 1-47: Architektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P3-Konfiguration – Beispiel Mercedes AMG [86]

Ein P3-Hybridfahrzeug ist dadurch gekennzeichnet, dass die E-Maschine am Getriebeabtrieb angeordnet ist und somit keine Gangstufen des Getriebes verwendet. Durch Anordnung der elektrischen Maschine an der Hinterachse wirkt diese direkt auf das Differential und sorgt somit

unmittelbar für Vortrieb der Hinterräder ohne zusätzliche Verluste vom Getriebe. Zusätzlich bietet diese Fahrzeugkonfiguration eine verbesserte Achslastverteilung, sodass Vorteile in Bezug auf die Fahrdynamik des Fahrzeugs entstehen. So ermöglicht die elektrische Maschine an der Hinterachse die Steuerung der Radmomente ohne Eingriff des ESP. Im Vergleich zur P2-Anordnung ermöglicht die P3-Konfiguration eine höhere Effizienz beim Rekuperieren. Dies wird dadurch erreicht, dass das am Abtrieb anliegende Drehmoment, nicht zuerst durch das ganze Getriebe geleitet werden muss sondern direkt von der elektrischen Maschine an der Hinterachse genutzt wird. Die E-Maschine wird dabei mit einer niedrigeren Drehzahl und hohem Drehmoment betrieben, um die E-Maschine kompakt und höher drehend ausführen zu können, und um das zum Teil sehr hohe anliegende Drehmoment im Rekuperationsmodus der E-Maschine (Generatorbetrieb) zu begrenzen, ist bei diesem Fahrzeug eine Übersetzungsstufe zwischen Elektromotor und Abtrieb notwendig. Allerdings ist bei der P3-Anordnung eine zusätzliche Startereinheit erforderlich, um die Start-Stopp-Funktion ausführen zu können. [7] [15]

Des Weiteren kann beim P3-System das Hochvolt-Batteriesystem im Stillstand nicht vom Verbrennungsmotor geladen werden. Diese Hybridarchitektur erlaubt, allerdings ohne Modifikationen am Primärgetriebe, eine einfache modulare Integration in den Antriebsstrang. Neben der Anwendung in leistungsstarken Sportfahrzeugen kann die P3-Hybridisierung auch für kostengünstige Hybridisierungen bestehender Antriebsstränge und Hybridantriebe mit dem Hauptaspekt der effizienten Energierückgewinnung eingesetzt werden. [7] [15]

2. Komponenten elektrischer Antriebssysteme

In diesem Unterkapitel werden die Grundlagen sowie Funktionsweisen der wesentlichen Komponenten von elektrischen Antriebssystemen beschrieben. [16]

- Als elektrochemischer Energiespeicher werden vorwiegend Batterien basierend auf der Lithium-Ionen-Technologie eingesetzt. Dies ist grundsätzlich auf die hohen spezifischen Energie- und Leistungsanforderungen von Hybrid- und batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen zurückzuführen.
- Zur Umwandlung der gespeicherten elektrischen Energie in mechanische Energie werden zum Antrieb der Räder elektrische Maschinen verwendet (Elektromechanischer-Energiewandler). Dabei kommen derzeit hauptsächlich Permanent-erregte Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen zum Einsatz. In Abhängigkeit vom Wirkungsgrad, Gesamtgewicht der Maschine, von der Leistungsdichte, von der Betriebssicherheit, von der Bedienbarkeit, von den Kosten sowie von der Rohmaterialverfügbarkeit wird der jeweilige E-Maschinentyp ausgewählt.
- Die Leistungselektronik erzeugt die Hochvolt-Wechselspannung für die Antriebsmotoren und regelt Frequenz, Spannung und Phasenlage des Stroms.
- Auch batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge verwenden Getriebeeinheiten zur Kraftübertragung. So können die elektrischen Maschinen durch geeignete Getriebeübersetzungen kompakter gestaltet werden. Außerdem können beim elektrischen Fahren durch ein schaltbares 2-Gang-Getriebe optimalere Betriebspunkte der E-Maschine, höhere Zugkräfte oder höhere Drehzahlen erzielt werden. Bei Hybridelektrisch betriebenen Fahrzeugen erfolgt die Anordnung der E-Maschine typischerweise im oder im Zusammenspiel mit dem Getriebe. Mithilfe von Planetenstufen können für leistungsverzweigte Getriebe die Drehmomentflüsse aufgeteilt und summiert werden.

2.1 Energiespeicher

Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswahl sind dabei die spezifischen Leistungs- und Energiedichten. Darüber hinaus spielt die Sicherheit eine große Rolle, da gerade im Fahrzeugeinsatz hohe mechanische und thermische Belastungen auftreten und besondere Ereignisse wie Fehlbedienung, Unfälle oder Beschädigungen nicht zu Kurzschlüssen oder thermischem Durchgehen der Batterien führen dürfen. Wesentlichen Kenngrößen zur Charakterisierung einer Batteriezelle oder eines Batteriesystems sind: [7] [38]

- **Kapazität [Ah, Wh, kWh]:** elektrische Ladungsmenge oder Energieinhalt einer Zelle oder Batterie. Für ein gesamtes Batteriesystem, normalerweise in [kWh] angegeben, da dieser Wert gut mit der Reichweite in Verbindung gebracht werden kann.
- **Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]:** Speicherfähigkeit in Bezug auf das Gewicht. Diese hat in E-Fahrzeugen eine große Rolle in Bezug auf elektrische Reichweite und Zuladung.
- **Volumetrische Energiedichte [Wh/l]:** beschreibt den Volumenbedarf für einen bestimmten Energieinhalt. Wesentliche Kenngröße für die Raumökonomie in Fahrzeugen.

- **Gravimetrische Leistungsdichte [W/kg]:** Im Fahrbetrieb wesentliche Kenngröße für Beschleunigungsverhalten und Rekuperationspotential. Beim Schnellladen bestimmend für Ladezeiten und Alterung.
- **Volumetrische Leistungsdichte [W/l]:** Raumökonomie im Verhältnis zur Leistung. Sehr relevant für Hybridfahrzeuge, insbesondere wenn bestehende Fahrzeugkonzepte nachträglich elektrifiziert werden sollen.
- **C-Rate [1/h]:** beschreibt die zum Laden/Entladen verwendete Strommenge im Verhältnis zur Kapazität. Zum Beispiel: Batteriekapazität von 75 Ah bei 400V – Laden mit 150A bei 400V (60kW) ergibt eine C-Rate von 2C. Eine daraus abgeleitete Interpretation ist die Ladedauer. Eine C-Rate von 1C bedeutet eine Vollauffüllung in 1 Stunde, 2C in ½ Stunde, 4C in ¼ Stunde.
- **Kalendarische-Lebensdauer [Jahre]:** beschreibt die Alterung von Energiespeichern ohne elektrische Belastung. Diese wird hauptsächlich durch eine temperaturabhängige Zersetzung von Elektrolyten in Verbindung mit Aktivmaterial und Korrosion verursacht. Manchmal wird damit auch die Lebensdauer unter typischen Nutzungsbedingungen verstanden.
- **Zyklen-Lebensdauer [Anzahl Zyklen]:** beschreibt die Anzahl der Lade-/Entladezyklen, die eine Batterie unter bestimmten Bedingungen bis zu einer festgelegten Restkapazität durchführen kann. In der Regel wird diese Lebensdauer bei einer C-Rate von 0,5 und bei Raumtemperatur ermittelt.
- **State of Charge – Ladezustand (SoC) [%]:** der Prozentsatz der verfügbaren Ladung einer Batterie im Verhältnis zur maximalen Kapazität.
- **Depth of Discharge DoD [%]:** definiert als $(100 - \text{SoC})$ in Prozent, d. h. der Prozentsatz der Gesamtladung der Batterie, der verbraucht wurde
- **State of Health – Gesundheitszustand (SoH) [%]:** vergleicht den Zustand der Batterie im Verhältnis zu ihrem Idealzustand in Prozent. Der SoH-Wert ist nicht auf einen bestimmten physikalischen Zustand festgelegt. In der Regel werden dabei folgende Faktoren berücksichtigt: Kapazität, Spannung, Lade- und Entladeverhalten.
- **State of Function – SoF [1/kWh]:** gibt den Zustand der Batterie in Bezug auf die nutzbare Energie wieder, indem der SoC-Wert im Verhältnis zur verfügbaren Kapazität betrachtet wird.
- **Ladeeffizienz:** definiert als das Verhältnis zwischen der nutzbaren Energie der Batterie während einer vollständigen Entladung und der Energiemenge, die zum vollständigen Laden der Batterie benötigt wird.

Elektrochemische Energiespeichersysteme haben im Vergleich zu chemisch gebundener Energie, wie beispielsweise konventionelle Kraftstoffe, erhebliche Nachteile hinsichtlich der Energiedichte. Herkömmliche fossile Kraftstoffe hingegen haben erhebliche Nachteile in Bezug auf den CO₂ Haushalt und die Umweltbelastung.

Es ist zwischen Primär- und Sekundärbatteriespeichern zu unterscheiden, wobei letztere auch als Akkumulatoren bezeichnet werden. Im Gegensatz zu Primärbatteriespeichern sind Sekundärbatteriespeicher wiederaufladbar, weshalb im Folgenden nur diese betrachtet werden. Im deutschen Sprachgebrauch werden Lithium-Ionen-Akkumulatoren fälschlicherweise auch als Lithium-Ionen-Batterien bezeichnet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aber der Begriff Batterie für einen wiederaufladbaren Akkumulator gebraucht, da dies dem englischen Sprachgebrauch („battery“) entspricht und sich durchgesetzt hat. [38]

Abbildung 2-1 zeigt in Abhängigkeit der Entladezeit die spezifischen Leistungs- sowie Energiedichten von ausgewählten elektrochemischen Energiespeichern im Vergleich zu Doppelschicht- und Elektrolytkondensatoren.

Die höchste Energiedichte aller Systeme bietet die Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion). In Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Energie- und Leistungsdichte führen die unterschiedlichen Anforderungen von elektrifizierten Antriebssystemen zu verschiedenen Batterie-Charakteristiken. So erfolgt die Auslegung der Batterie für ein Vollhybridfahrzeug auf hohe spezifische Leistungsdichte, um ausreichend Leistung beim Beschleunigungsvorgang zur Verfügung zu stellen und um möglichst hohe Rekuperationsleistung in das Batteriesystem einspeisen zu können. Bei batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen hingegen, erfolgt die Auslegung auf hohe spezifische Energiedichte, um hohe elektrische Reichweiten zu erreichen. Die aktuell erreichbare Energiedichte von automotiven Lithium-Ionen-Zellen beträgt im Jahr 2021 ca. 250 Wh/kg. Lithium-Ionen-Batterien weisen allerdings begrenzte Zyklenzahlen auf, welche stark vom Nutzungsverhalten der Batterie abhängen. [38]

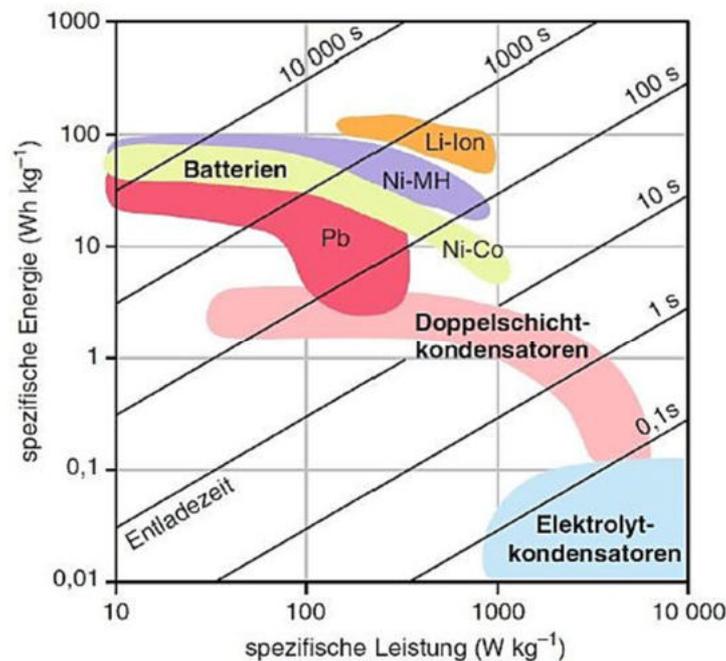


Abbildung 2-1: Vergleich von ausgewählten Batterien und Kondensatoren [38]

Nickel-Metallhydrid-Batterien (Ni-MH) sind preiswerter und robuster, aber ermöglichen nur annähernd die Hälfte der Energiedichte von Li-Ionen-Batterien. Die Blei-Säure-Batterien (Pb) ist der am häufigsten verwendete Batterietyp in Kraftfahrzeugen. Allerdings sind diese als Energiespeicher für Traktionsantriebe nur bedingt geeignet und werden daher hauptsächlich als Starterbatterie und zur Versorgung der Niedervoltverbraucher eingesetzt. [7] [38]

Eine weitere Möglichkeit elektrische Energie zu speichern, ist die Kondensatortechnologie. Aufgrund der batterieähnlichen Struktur mancher Kondensatortypen werden diese häufig als elektrochemische Speicher eingestuft. Im Vergleich zur Batterietechnologie weisen Doppelschichtkondensatoren gleichen Gewichts nur etwa 10 % der Energiedichte von Bleibatterien auf. Bei Elektrolytkondensatoren ist die erreichbare Energiedichte noch erheblich geringer. Allerdings ist die Leistungsdichte der genannten Kondensatoren rund 10– bis 100-Mal höher als bei Batterien und Kondensatoren können daher viel schneller geladen und entladen werden. Demnach eignet sich die Kondensatortechnologie für Anforderungen mit sehr hohen und kurzen Leistungsbedarfen. Des Weiteren zeichnen diese sich durch eine hohe Zyklenzahl aus, wodurch sie eine attraktive Ergänzung zur Batterietechnologie darstellt. Mögliche Einsatzgebiete bilden beispielsweise die Verwendung als Speicher zusätzlicher

elektrischer Energie im KERS-System eines Formel-1-Fahrzeugs oder für das regenerative Bremsen von Bus- und Schienenfahrzeugen. [7] [38]

2.1.1 Lithium-Ionen-Batterie

Lithium-Ionen-Batterien sind durch die permanente Weiterentwicklung mittlerweile Stand der Technik für die Anwendung als Energiespeicher von elektrifizierten Antriebssystemen. Lithium weist bei 20 °C eine Dichte von nur 0,534 kg/dm³ auf und ist somit das leichteste aller Metalle (es schwimmt in Wasser). Das Leichtmetall ist in der Erdkruste in ähnlichen Mengen wie Zink, Kupfer oder Blei vorhanden. Lithium-Ionen-Batterien werden je nach Anforderungen, wie höchste spezifische Leistungs- oder Energiedichte, maximaler Zyklen-Lebensdauer und Kosten ausgelegt. Die Lithium-Ionen-Batterie steht für eine ganze „Klasse“ von Batterien mit unterschiedlichen Reaktionsmaterialien.

Elektrochemische Funktionsweise

Bei Lithium-Ionen-Batterien basiert die Energiewandlung auf der Redoxreaktion einer galvanischen Zelle. Das bedeutet, dass an der Anode die Oxidation eines Stoffes stattfindet und an der Kathode die Reduktion eines Stoffes abläuft. Die grundlegende elektrochemische Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle wird anhand Abbildung 2-2 erläutert. Der ionenleitende Elektrolyt LiPF₆ (Lithiumhexafluorophosphat) durchtränkt beide Elektroden (Anode und Kathode). Außerdem befindet sich ein Separator dazwischen, der aus einer Lithium-Ionen durchlässigen porösen Membran (Polyethylen, Polypropylen) besteht und die beiden Elektroden voneinander trennt. Beim Lade- und Entladevorgang der Batterie wandern einzelne positiv geladene Lithium-Ionen zwischen positiver und negativer Elektrode hin und her und lagern sich in den Aktivmaterialien ein (wechselseitige Interkalation). Auf jedem der metallischen Stromsammler befindet sich ein getrocknetes Substrat aus Anoden- bzw. Kathodenmaterial. An der Kathode (positive Elektrode) werden Oxide als aktive Materialien bevorzugt, da sie eine Interkalationsbindung (Einlagerungsverbindung) mit dem Lithium eingehen. Es kann eine Vielzahl von Lithiumverbindungen als Kathodenmaterial eingesetzt werden. Als Aktivmaterialien an der Anode kommen meist Graphit oder Kohlenstoffe zum Einsatz, die ebenso Lithium-Ionen speichern können. [14]

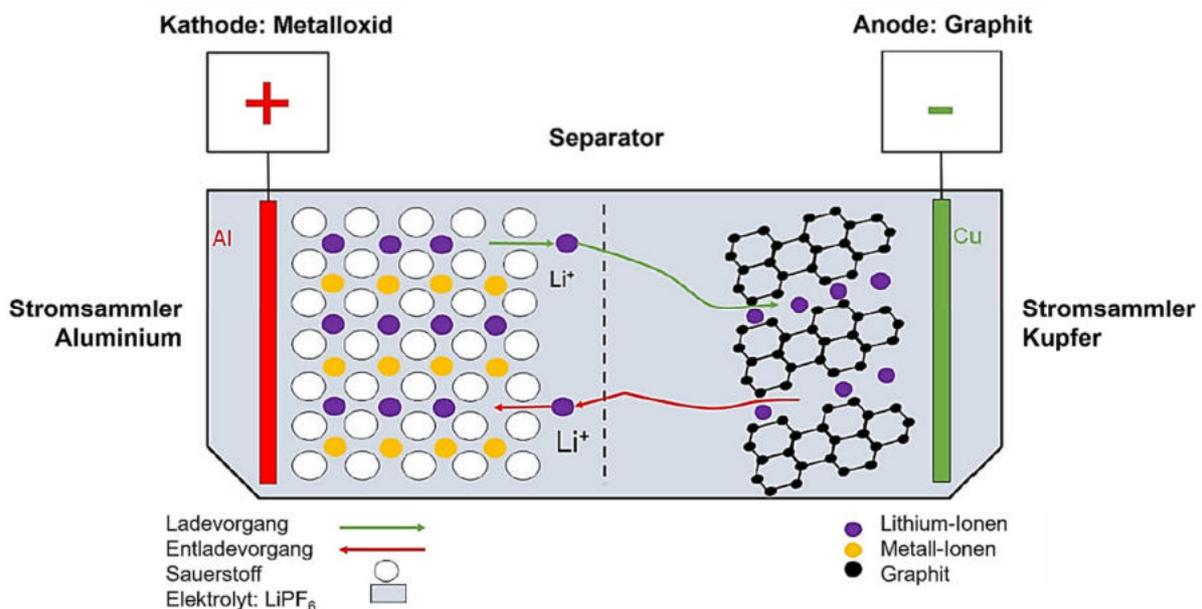


Abbildung 2-2: Prinzipieller Aufbau und elektrochemische Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle [14]

Die Elektrodenwerkstoffe werden auf einer dünnen Metallfolie aufgebracht, die gleichzeitig als Stromsammler eingesetzt wird. Als Stromsammler dienen meist Aluminium an der positiven und Kupfer an der negativen Elektrode. Während des Entladevorgangs wandern die Li-Ionen von der negativen Elektrode durch den Elektrolyten und durch den Separator zur positiv geladenen Elektrode.

In Kompensation fließen die Elektronen, welche die Träger des elektrischen Stroms darstellen, über einen äußeren Stromkreis (Kabelverbindung) von der negativen zur positiven Elektrode, wobei hier die Spannung abgegriffen wird. Ist die Batterie entladen, befindet sich das Lithium in Form von Ionen in der positiven Elektrode. Beim Ladevorgang kehrt sich dieser Vorgang um, sodass in diesem Fall unter Stromzufuhr die Lithium-Ionen von der positiv geladenen Elektrode durch den Elektrolyten und den Separator zur negativ geladenen Elektrode wandern. [14]

Im Allgemeinen verfügen Lithium-Ionen-Batterien über eine höhere Entladekapazität im Vergleich zu ihrer Ladekapazität. Das bedeutet, dass in der gleichen Zeit mehr Strom aus der Hochspannungsbatterie entnommen werden kann, als gespeichert werden kann. Dieses Verhalten ist auf die elektrochemische Reaktion in der Zelle zurückzuführen. Lithium-Ionen-Batterien haben einige Eigenschaften, die für die Anwendung wichtig sind und im Folgenden zusammengefasst werden. [38] [39]

- Je nach verwendeter Zellchemie erfahren die Kathoden- und Anodenmaterialien bei der Lithium-Ionen Ein- und Auslagerung eine mehr oder weniger ausgeprägte Veränderung des Volumens, welche zu einer Schwellung der Zelle führen. Dieser Vorgang ist auch unter „Atmen“ der Zelle bekannt und muss bei der Konstruktion des Batteriegehäuses berücksichtigt werden, da bei fester Einspannung der Zellen sehr hohe Kräfte auftreten können. Hohe Druckbelastung an den Aktivmaterialien führt zu einer Verkürzung der Lebensdauer der Batterie.
- Im Laufe der Lebensdauer kommt es durch chemische Prozesse zu einer Ablagerung von Salzen auf dem Aktivmaterial der negativen Elektrode auf. Infolgedessen nimmt die Kapazität der Batterie ab, da ein Teil der im Elektrolyten gelösten Li-Ionen nicht mehr an den elektrochemischen Reaktionen teilnehmen kann.
- Zusammengefasst vermindern die Alterungsvorgänge die Bewegung der Lithium-Ionen innerhalb der Zelle. Die Lebensdauer von Batteriezellen hängt somit von den Betriebsbedingungen, den verwendeten Materialien sowie der Zusammensetzung des Elektrolyten ab. Je nach Anwendung, Aufbau der Lithium-Ionen-Batteriezelle und den Betriebsbedingungen variiert die Lebensdauer.
- Lithium-Ionen-Batterien vertragen keine Über- oder Unterspannung durch übermäßiges Laden oder Tiefentladen. Bei einer Überladung besteht die Gefahr des thermischen Durchgehens durch Selbstentzündung der Zelle. Eine zu hohe Ladespannung bewirkt einen zu hohen Stromfluss innerhalb der Zelle und somit einen erhöhten Temperaturanstieg.

Im Falle einer Tiefentladung auf unter 2,4 Volt Zellspannung kommt es zu einer irreversiblen Schädigung an den Aktivmaterialien, wodurch ein Kapazitätsverlust entsteht. Eine Tiefentladung kann durch die Bildung von sogenannten Dendriten an der Anode ausgelöst werden. Dendriten sind spitze Kristalle, welche den Separator durchdringen können, was zu einem lokalen Kurzschluss der Zelle führen kann.

- Im Falle einer Übertemperatur beginnt zuerst der Elektrolyt zu verdampfen und die meisten Zelltypen gasen aus. Deshalb muss bei der Konstruktion darauf geachtet werden, dass diese Gase abgeführt werden können.
- In Abhängigkeit ihrer geometrischen Form (z.B. rund, prismatisch, in Folien verpackt) müssen Lithium-Ionen-Zellen zunehmend vor mechanischen Belastungen sowie vor Eindringung von

Fremdkörpern geschützt werden, um interne Kurzschlüsse und somit thermisches Durchgehen zu vermeiden.

- Wegen der Temperaturabhängigkeit der Stromausgangsleistung sollte eine hohe Belastung von kalten Zellen unbedingt vermieden werden, um Beschädigungen in der Zelle vorzubeugen. Die Idealtemperatur einer Lithium-Ionen-Zelle liegt etwa im Bereich zwischen 20°C und 40°C. Zell-Temperaturen unter -20°C und über 60°C sollten auf jeden Fall ausgeschlossen werden. Zur Einhaltung der Idealtemperatur in jedem Betriebszustand sorgt das Batterie-Managementsystem in Verbindung mit dem Thermomanagementsystem der Hochvoltbatterie.
- Lithium-Ionen-Batterien sind je nach Zellchemie und Zelldesign in der Lage, die Energie über längere Zeit ohne größere Verluste zu speichern. Sie weisen im Allgemeinen eine sehr geringe Selbstentladung auf. Diese beträgt je nach Lagerbedingung (Temperatur und Ladezustand) zwischen 2-5% im Monat.
- Bei niedrigen Ladeströmen in der Batterie kann eine Ladeeffizienz von nahezu 100% erreicht werden. Allerdings auf Kosten einer sehr langen Ladedauer. Beim Schnellladen hingegen entstehen zum Teil hohe Verlustleistungen von bis zu 10% der Ladeleistung, wodurch sich die Temperatur im Batteriesystem erhöht und somit die Ladeeffizienz abnimmt. Beim Entladen der Batterie beträgt die Effizienz in der Regel um die 95% und mehr.
- Abbildung 2-3 zeigt die Last- und Temperaturabhängigkeit der Entladekurven einer ausgewählten Lithium-Ionen-Batterie mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) als Kathodenwerkstoff. In (a) ist ersichtlich, dass die verfügbaren Zellspannungen mit geringerem Ladezustand und bei hohen Strömen abnehmen. Aufgrund des Innenwiderstands der Zelle wird die restliche Energie in Wärme umgewandelt. Mit zunehmender Entladungsrate (C-Rate) nimmt die Fläche unter den Spannungskurven ab, d.h. die nutzbare Kapazität wird kleiner. In (b) ist die verfügbare Kapazität in Abhängigkeit verschiedener Temperaturen dargestellt. Bei sinkenden Temperaturen nimmt somit die Kapazität der Zellen ab. Dieser Verlust an verfügbarer Kapazität ist allerdings nicht dauerhaft, sondern wird wieder verfügbar, wenn sich die Batterie erwärmt.

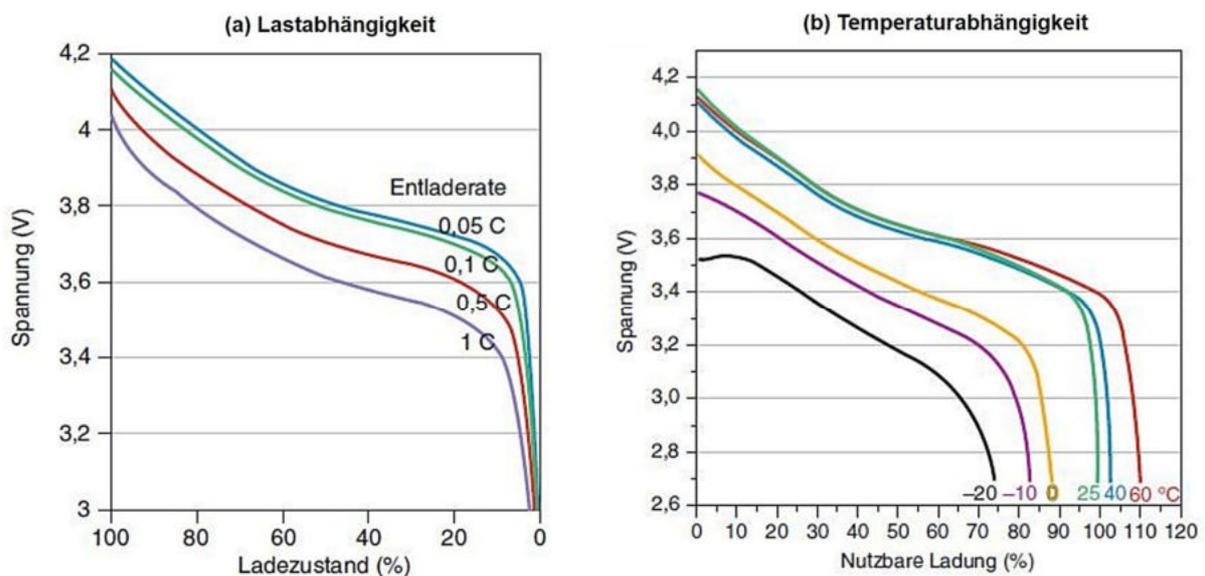


Abbildung 2-3: Entladekurven einer Lithium-Ionen-Batterie [38]

Zellmaterialien

In Abbildung 2-4 sind die spezifischen Kapazitäten und Spannungspotentiale verschiedener Materialien für die negativen und positiven Elektroden von Lithium-Ionen-Zellen dargestellt. Die Zellspannung ergibt sich aus der Potentialdifferenz zwischen negativer und positiver Elektrode. Das Produkt aus der Zellspannung und Kapazität ergibt die gespeicherte Energie. Die Energiespeicherfähigkeit der beiden Elektroden sollte allerdings annähernd gleich sein. [40]

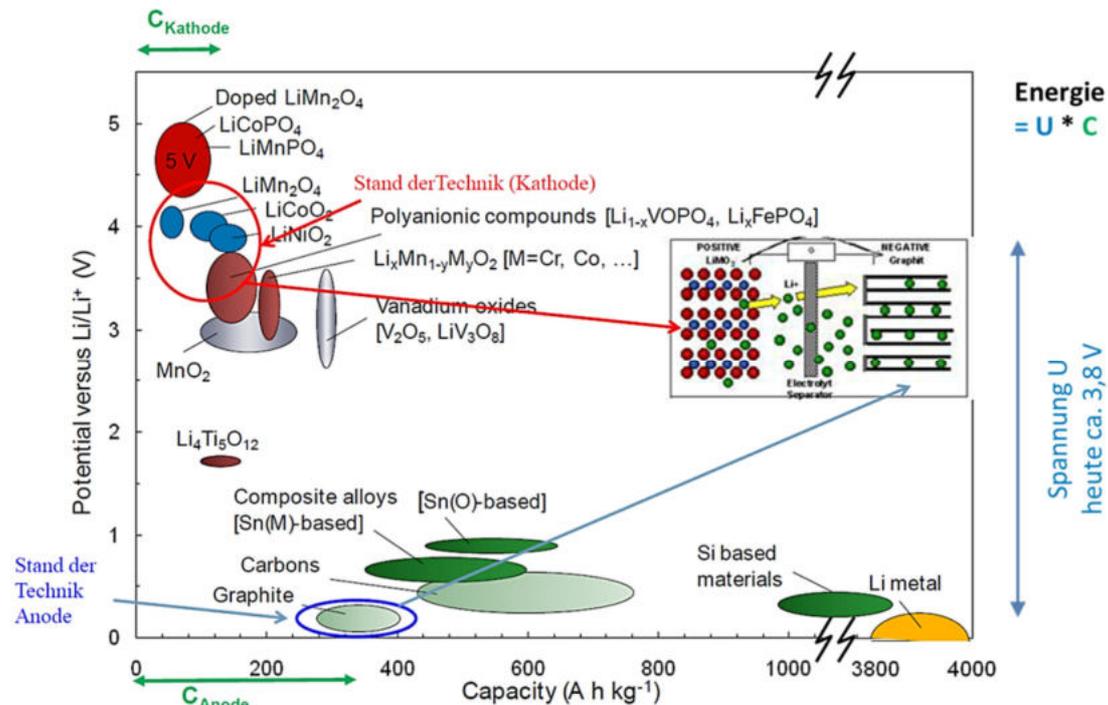


Abbildung 2-4: Spezifische Kapazität und Spannung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien [40]

• Negative Elektrode (Anode)

Graphit ist Stand der Technik bei den Elektrodenmaterialien. Eine höhere Leistungs- und Energiedichte wird mit amorphen Kohlenstoffen (harte und weiche Kohlenstoffe) erreicht, die auch für Automobilanwendungen immer wichtiger werden. Um die Speicherkapazität im Vergleich zu Kohle-Interkalationsverbindungen zu erhöhen, wurde die Verwendung von Metallen und Legierungen untersucht, die reversibel mit Lithium reagieren können. Diese haben jedoch aufgrund von Problemen in der Zyklen-Stabilität bisher noch nicht den Weg in die Großserienproduktion gefunden. Lithiumtitanat und Titanoxid kommen für die aktiven Massen der negativen Elektrode in Frage, da sie eine hohe Zyklen-Stabilität aufweisen und hohen Leistungs- und Sicherheitsanforderungen genügen. Die Speicherkapazität stellt hier jedoch ein Problem dar.

Die Verwendung der Materialien ist nicht nur von den elektrochemischen Eigenschaften der Werkstoffe abhängig, sondern ebenso von der Möglichkeit der Verarbeitung zur Elektrodenherstellung. [14] [39]

• Positive Elektrode (Kathode)

Bei der Auswahl von Materialien für positive Elektroden sind die Volumenänderung sowie die Aufnahmekapazität und Leistung bei der Speicherung von Lithium-Ionen, die Temperaturstabilität und die Löslichkeit im Elektrolyten (Ausmaß der maximalen Lösung im Lösungsmittel) die wichtigsten Kennzahlen. Grundsätzlich werden die Materialien anhand ihrer Kristallstruktur (Schichtoxide, Spinelle und Phosphate) unterschieden, da diese einen erheblichen Einfluss auf die elektrochemischen

Reaktionsmechanismen, die Potenzialkurven und die Stabilität im geladenen und ungeladenen Zustand haben. Aufgrund der hohen Arbeitsspannungen und der daraus resultierenden hohen Energiedichte sind geschichtete Oxide eindeutig im Vorteil. Dies ist auf das Redox-Verhalten der Nickel,- Kobalt- und Mangan-Ionen zurückzuführen. Allerdings sind diese Elemente aufgrund ihrer Seltenheit teuer. Da Eisen sehr häufig vorkommt, sind Lithiumeisenphosphate bei der Herstellung von 1 kg negativer Elektrode preislich am günstigsten. Bei den Kosten pro kWh ist die Spannbreite geringer, weil die Energiedichte der Lithium-Eisen-Phosphat Zelle geringer ist. Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) verfügt über gute Schnelllade- und -Entladeeigenschaften und eignet sich daher, je nach Schwerpunkt der Anwendung, gut für Traktionsbatterien. Im Batterie-Pack beträgt das Gewicht von Lithium nur ca. 1-1,5% des Gesamtgewichts. [32] [39]

Kathodenwerkstoff	Nennspannung	Kapazität	Energiedichte
LiCoO ₂ , LCO (Lithium-Cobalt-Oxide)	3,9 V	160 Ah kg ⁻¹	624 Wh kg ⁻¹
LiCo _{0,85} Al _{0,15} O ₂ , NCA (Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide)	3,7 V	200 Ah kg ⁻¹	740 Wh kg ⁻¹
LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂ , NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide)	3,7 V	160 Ah kg ⁻¹	592 Wh kg ⁻¹
LiMn ₂ O ₄ , LMO (Spinell)	4,1 V	100 Ah kg ⁻¹	410 Wh kg ⁻¹
LiFePO ₄ , LFP (Lithium-Eisenphosphat)	3,4 V	160 Ah kg ⁻¹	544 Wh kg ⁻¹
LiFe _{0,15} Mn _{0,85} PO ₄ , LFMP (Lithium-Eisen-Mangan-Phosphat)	4,0 V	150 Ah kg ⁻¹	590 Wh kg ⁻¹

Tabelle 2-1 : Arbeitsspannung, Kapazität und Energiedichte von Zellen mit negativer Graphitelektrode und häufige Materialien für positive Elektroden [39]

- **Elektrolyt**

Die Hauptaufgabe des Elektrolyten besteht darin, Lithiumionen zwischen der positiven und der negativen Elektrode zu transportieren. Es setzt sich aus Lösungsmittelmischungen und einem Leitsalz zusammen. Die wichtigsten Anforderungen sind hohe Leitfähigkeit, Zyklen-Stabilität, chemische Verträglichkeit mit Elektroden und inaktiven Materialien, Umweltverträglichkeit sowie Sicherheitsverhalten bei max. Betriebstemperatur der Zelle. Des Weiteren sind Langzeitstabilität, niedriger Schmelzpunkt und hoher Siedepunkt ebenfalls erforderlich. Ether und Ester, einschließlich organischer Carbonate, haben sich als Lösungsmittel etabliert. Lithiumhexafluorophosphat (LFP6) wird überwiegend als Leitsalz verwendet. Es befinden sich bereits gel- und feststoffähnliche Ausführungen von Elektrolyten in Entwicklung. [14] [32]

- **Separatoren**

Die am meisten eingesetzten Separatoren sind Membrane auf Basis von Polyolefin (dünne Kunststofffolien), in welche durch ein physikalisches Verfahren mikroskopisch kleine Öffnungen eingebracht werden. Die Dicke dieser Membran hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Diese beträgt normalerweise zwischen 20 und 30 µm, mit einer Porengröße von 0,03-0,5 µm. Eine wichtige Kenngröße ist die Porosität des Separators, welche etwa 40% beträgt. [14] [32]

Schichtaufbau

Für den inneren Aufbau einer automotiven Lithium-Ionen-Zelle werden die Zellmaterialien grundsätzlich in drei verschiedenen Varianten aufgebaut, siehe Abbildung 2-5. Eine Lithium-Ionen-Zelle kann demnach zylindrisch, prismatisch und flach ausgeführt sein. Die Herstellung der zylindrischen und prismatischen Zellen erfolgt in der Regel in einem Wickelverfahren. Die Wickel

werden anschließend in ein Metallgehäuse gepackt. Im Gegensatz dazu gibt es noch die sogenannten Pouch (deutsch Beutel) - oder „coffee-bag“-Zellen. Dabei werden die gestapelten Aktivmaterialien in eine Folienverpackung eingeschlossen. Die offenen Seiten des Außenbeutels werden meist thermisch verschweißt. Nur die äußeren Anschlusselektroden kommen aus der beutelförmigen Zellverpackung heraus. Pouch-Zellen werden im Z-Stapelverfahren durch Schichtung der Folien hergestellt. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten ergeben sich erhebliche Unterschiede bei der Verschaltung und im Packaging (Verpackung) der Zellen. Daraus folgt wiederum ein unterschiedliches Kühlungsverhalten, da die Wärmeleitfähigkeit in Folienrichtung um mehr als eine Größenordnung höher ist als in Schichtrichtung. [39]

Je nach Anwendung kommen unterschiedliche Zellen zum Einsatz. Für Traktionsbatterien mit geringen Leistungen und Energieinhalten, wie für die Anwendung bei Mild- und Vollhybriden, werden tendenziell zylindrische Zellen verwendet. Bei Batteriesystemen für Plug-In-Hybride und rein elektrisch betriebene Fahrzeuge kommen vorwiegend prismatische- und Pouch-Zellen zum Einsatz.

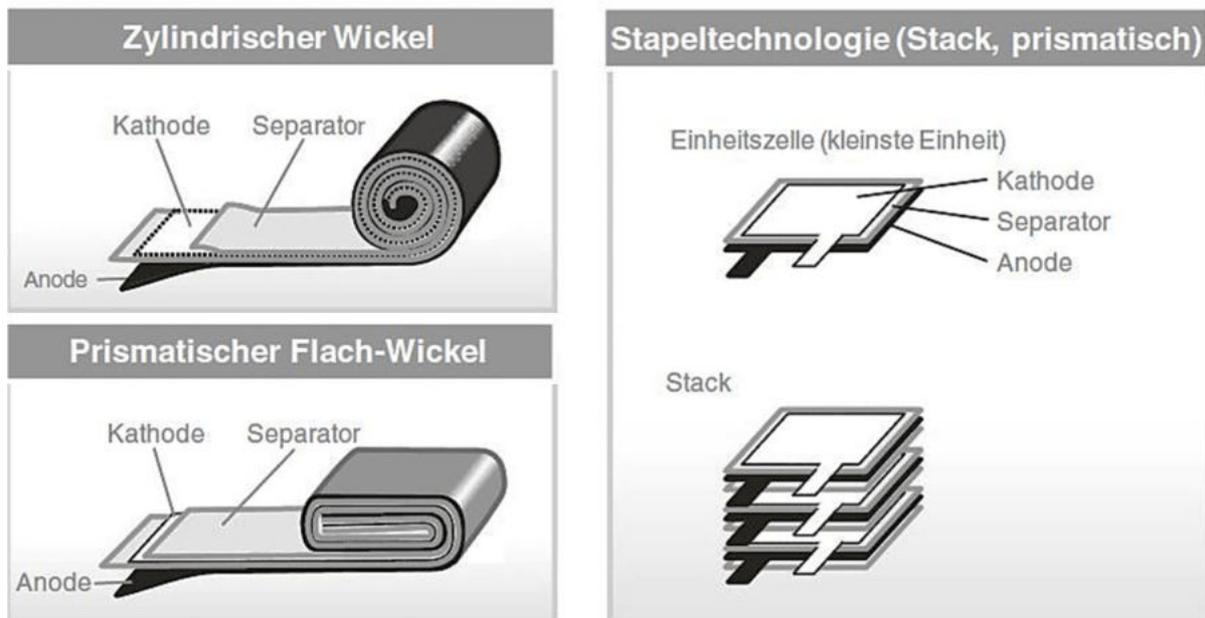


Abbildung 2-5: Hauptausführungen von Lithium-Ionen-Zellen im Schichtaufbauverfahren [39]

• Zylindrische Zellen

Der Elektrodenstapel (zylindrische Wicklung) befindet sich bei der Rundzelle in einem Aluminiumgehäuse, welches gleichzeitig auch als Ableiter für eine Elektrode verwendet werden kann. Die Wicklung setzt sich aus einer 4-lagigen Schichtstruktur zusammen (Anode-Separator-Kathode-Separator), die um einen Dorn gewickelt wird, bis die erforderliche Dicke und Kapazität erreicht ist. Eine Aktivschicht besteht aus einer Trägerfolie, welche als Stromableiter (Kupfer, Aluminium) dient, und welche beidseitig mit Aktivmaterial (Anoden- oder Kathodenmaterial) beschichtet ist. Die Robustheit durch das Aluminiumgehäuse ist ein nennenswerter Vorteil dieser Zellausführung. Außerdem sind die Produktionskosten aufgrund der jahrelangen Erfahrung niedrig. Eine zylindrische Zelle ist mit einem Sicherheitsventil ausgestattet, das einen unzulässig hohen Druck, beispielsweise durch Überhitzung und Überladung, verhindert. Aufgrund der richtungsabhängigen Wärmeleitung erfolgt die Kühlung dieser Zellen vorwiegend über die Grund- und Deckfläche, welche in einem geringen Verhältnis zum Volumen stehen und daher einen Nachteil darstellt, weil dadurch in der Zelle ein relativ hoher Temperaturgradient vorliegt. Durch das runde Gehäuse können zylindrische Zellen

das Problem der Volumenveränderung bei Lade- und Entladevorgängen gut bewältigen. Im Vergleich zur prismatischen Wicklung kann die Packungsdichte in einem Modul aus mehreren Zellen jedoch nicht so kompakt gestaltet werden.

Eine typische Anwendung für eine Rundzelle in einem vollelektrischen Fahrzeug ist die Zellenbezeichnung 18650. Die ersten beiden Ziffern charakterisieren dabei den Durchmesser in Millimeter und die folgenden Ziffern repräsentieren die Länge der Zelle in Zehntel-Millimeter. In diesem Fall hat die Rundzelle einen Durchmesser von 18mm bei einer Länge von 65mm. [7] [14]

- **Prismatische Zellen**

Bei dieser Zellausführung ist der Aufbau grundsätzlich ähnlich wie beim zylindrischen Wickel. Die einzelnen Lagen werden allerdings hier flach gewickelt anstatt um einen Dorn. Umgeben wird der Flachwickel von einem prismatischen, robusten Metallgehäuse. Aufgrund des geschlossenen Gehäuses ist die prismatische Zelle ähnlich wie die zylindrische mit einem Entgasungsventil ausgestattet. Es ist auch eine Ausführung als gestapelte prismatische Zelle möglich. Hierzu werden die Elektrodenpaare, welche durch einen Separator getrennt sind, übereinander angeordnet. Durch eine parallele Anordnung der einzelnen Elektrodenpaare kann eine große Kapazität erreicht werden. Die Separatoren werden dabei entweder Schicht für Schicht eingesetzt oder mittels einer so genannten Z-Faltung. Der positivste Aspekt der Stapeltechnologie ist die erhöhte Lebensdauer aufgrund geringerer mechanischer Spannungen im Zellinneren. Ein weiterer Vorteil der prismatischen Zelle ist ihre Kühlung. Aufgrund der großen Deckflächen kann eine gute Wärmeabfuhr bei gleichzeitig hoher Packungsdichte der Zellen ermöglicht werden, wobei der Bauraum für das Kühlsystem ebenso berücksichtigt werden muss. [41]

- **Pouch Zellen**

Dies ist die jüngste entwickelte Zellausführung. Pouch-Zellen werden auch engl. Coffee-Bag Zellen genannt, weil sie äußerlich an eingeschweißtes Kaffeepulver erinnern. Hier wird ähnlich wie bei der prismatischen Zellen die Stapeltechnologie verwendet. Der Hauptunterschied besteht in der Verpackung des Stapels. Zu diesem Zweck wird bei der Pouch-Zelle eine alumierte Kunststofffolienhülle eingesetzt. Da hier kein festes Metallgehäuse verwendet wird, besitzt die Zelle ein geringes Gewicht und kann mit geringen Dicken und anwendungsspezifischen Größen hergestellt werden. Ein weiterer Vorteil gegenüber den anderen beiden Zellausführungen ist die Kühlung der Pouch-Zelle. Durch ihre flache äußere Form haben sie gute Möglichkeiten zur Wärmeabfuhr. Auf ein Überdrucksicherheitsventil kann verzichtet werden, da sich die Hülle zuerst aufbläht und dann die Versiegelung der Gehäusefolie versagt, bevor Druck oder Temperatur zu hoch werden. Ein kritischer Aspekt ist jedoch die geringere mechanische Robustheit. Beim Aufbau des Batteriemoduls muss ein gewisser Raum vorgesehen werden, der ein Aufblähen der Gehäusefolien ermöglicht. [7]

Konstruktiver Aufbau Lithium-Ionen-Zelle

Der konstruktive Aufbau einer zylindrischen- sowie einer Pouch-Zelle ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Das Elektrodenmaterial besteht aus einer dünnen Kupfer-, bzw. Aluminiumfolienbeschichtung mit Aktivmaterialien, welche durch einen Separator voneinander getrennt sind. Die Folienwickel und -stapel sind mit einer Elektrolytflüssigkeit getränkt.

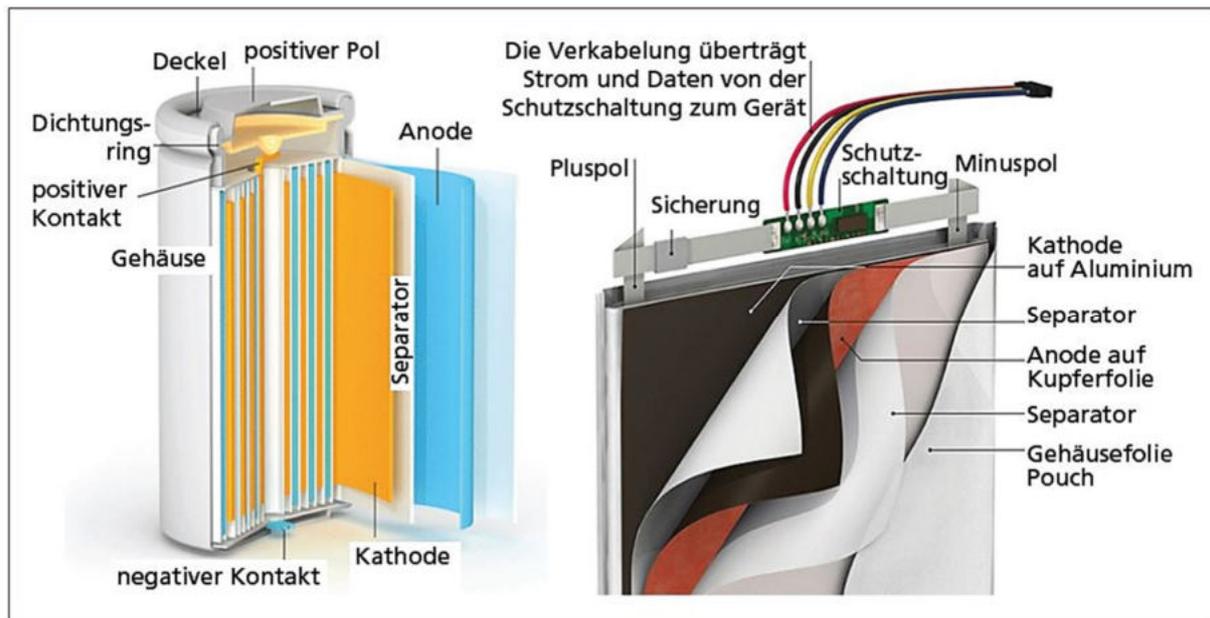


Abbildung 2-6: Konstruktiver Aufbau von einer zylindrischen- und einer Pouch-Zelle [42]

Eine nennenswerte Besonderheit im Gegensatz zu älteren Batterietechnologien, wie beispielsweise die Nickel-Metallhydrid-Batterie ist, dass hier keine chemische Reaktion der Elektroden erfolgt, sondern lediglich ein Umlagerungsprozess der Lithium-Ionen zwischen Anode- und Kathode. Auch das Elektrolytgemisch ist nicht chemisch beteiligt und dient nur dazu, den reibungslosen Transfer der Lithium-Ionen zu gewährleisten. Die Pouch-Zelle benötigt im Vergleich zur zylindrischen- oder prismatischen Zelle eine zusätzliche elektronische Komponente. Dieses Bauteil ist in der Regel innerhalb der Folienverpackung untergebracht und dient als Kurzschlussicherung. Die Dichtungen aller Zellausführungen haben die Aufgabe, zusätzlich zur Abdichtung des Inneren der Zelle, ebenfalls die elektrische Isolierung zwischen den beiden Elektroden zu gewährleisten. Die Dichtungskomponenten müssen daher eine elektrisch isolierende Wirkung aufweisen. Das Gehäuse oder die Hüllfolie von zylindrischen-, prismatischen- oder Pouch-Zellen besteht aus vernickeltem Stahl, Aluminium oder aus einer mit Kunststoff laminierten Aluminiumfolie. [39] [42]

Zelltyp	Vorteile	Nachteile
Zylindrisch	<ul style="list-style-type: none"> ✓ einfache Herstellung ✓ höchste erreichbare Energiedichte Zelle ✓ geringe Herstellkosten ✓ integrierte Sicherheitseinrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> – schlechtes Kühlverhalten – geringe Packungsdichte – geringe Volumendichte im Modul
Prismatisch	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gutes Kühlverhalten ✓ Geringes Volumen und Gewicht im Modul ✓ Integrierte Sicherheitseinrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> – teures Zellgehäuse – Aussteifung mit Endplatten notwendig – höheres Zell-Atmen – aufwändigere Herstellung als Rundzelle
Pouch	<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Energiedichte ✓ sehr flexible Ausführung möglich ✓ gutes Kühlverhalten und Wärmeableitung ✓ sehr geringes Gewicht ✓ Potential für geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> – geringe mechanische Belastbarkeit – keine Sicherheitseinrichtungen möglich – sehr hohes Zell-Atmen – Gefahr der Zell-Aufbläsung bei erhöhtem Zellinnendruck – ungewisse Langzeit-Dichtheit der Zelle

Tabelle 2-2: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der gängigen Zelltypen [43]

In Tabelle 2-2 sind die jeweiligen Vor- und Nachteile der beschriebenen Zelltypen nochmals zusammengefasst gegenübergestellt. Sowohl für prismatische als auch für Pouch-Zellen existiert ein

Zellformat-Standard nach dem Verband der Automobilindustrie (VDA). In Abhängigkeit von technischen Daten wie Kapazität, Leistung, Energie- und Leistungsdichte sind die Zellabmessungen vorgegeben, siehe Abbildung 2-7.

Prismatische VDA-Standardzellen für HEV-, PHEV- und BEV-Applikationen

	HEV	PHEV 1	PHEV 2	BEV 1	BEV 2
Maße	85 x 125 x 12,5 mm 	85 x 173 x 21 mm 	91 x 148 x 26,5 mm 	115 x 173 x 32 mm 	115 x 173 x 45 mm 
technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • 5,5 Ah • 700 W @ 225 A • >90 Wh/kg, 160 Wh/ltr • >3000 W/kg, 5000 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 22 Ah • 850 W @ 300 A • >115 Wh/kg, 225 Wh/ltr • >1400 W/kg, 2800 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 24-28 Ah • 850 W @ 300 A • >115 Wh/kg, 225 Wh/ltr • >1400 W/kg, 2800 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 40-44 Ah • 1000 W @ 300 A • >120 Wh/kg, 270 Wh/ltr • >500 W/kg, 1100 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 60-66 Ah • 1200 W @ 300 A • >120 Wh/kg, 270 Wh/ltr • >500 W/kg, 1100 W/ltr

Pouch VDA-Standardzellen für HEV-, PHEV- und BEV-Applikationen

	HEV	PHEV	BEV
Maße	121 x 243 x X mm 	165 x 227 x X mm 	162 x 330 x X mm 
technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • 5,5 Ah • 700 W @ 225 A • > 100 Wh/kg, 180 Wh/ltr • > 3500 W/kg, 5500 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 20-22 Ah • 850 W @ 300 A • > 125 Wh/kg, 250 Wh/ltr • > 1600 W/kg, 3000 W/ltr 	<ul style="list-style-type: none"> • 50-54 Ah • 1100 W @ 300 A • > 140 Wh/kg, 300 Wh/ltr • > 700 W/kg, 1500 W/ltr

Abbildung 2-7: Maße prismatischer- und Pouch-Zellen für automobiler Anwendungen nach VDA-Richtlinien [44]

Die wichtigsten Kenngrößen für Lithium-Ionen-Zellen mit ähnlichem Fertigungsjahr sind in Tabelle 2-3 gegenübergestellt. Die Bruttokapazität einer Zelle bezieht sich immer auf die maximale speicherbare Energiemenge.

	Rundzelle 21700 aus Tesla Model 3 (2017)	Prismatische Zelle aus BMW i3 (2018)	Pouchzelle aus Renault Zoe (2017)
Hersteller	Panasonic/Tesla	Samsung SDI	LG Chem
Kathodenmaterial	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
Abmessung	∅21x70mm	173x125x45mm	325x125x11,5mm
Nennspannung	3,65 Volt	3,7 Volt	3,6 Volt
Kapazität	4,65Ah netto 5Ah brutto	108Ah netto 120Ah brutto	59,5Ah netto 65Ah brutto
Gewicht	71 Gramm	2010 Gramm	965 Gramm
Volumetrische Energiedichte (netto)	700 Wh/l	410 Wh/l	460 Wh/l
Gravimetrische Energiedichte (netto)	≈240Wh/kg	≈200Wh/kg	≈225Wh/kg

Tabelle 2-3: Vergleich verschiedener Zelltypenausführungen hinsichtlich relevanter Kenngrößen [45]

Die Nettokapazität hingegen bezieht sich auf die Energiemenge, die tatsächlich genutzt werden kann und ist entsprechend geringer als die Bruttokapazität. Es wird demnach nur ein Teil der Gesamtkapazität zur Verfügung gestellt, um Überladung und Tiefentladung des Batteriesystems zu vermeiden. Permanentes Ausnutzen der gesamten Kapazität verringert die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie.

Es ist ersichtlich, dass die prismatische Zelle im Vergleich zu den anderen beiden die niedrigsten Energiedichten der Zellen aufweist. Die Spreizung bei rein volumetrischer Betrachtungsweise ist im Vergleich noch höher. Dies ist auf die sehr gut Packungsdichte der Rundzelle zurückzuführen. Jedoch wird dieser Vorteil der zylindrischen Zelle auf Modul- und Gesamtsystemebene teilweise wieder aufgebraucht. Das bedeutet, die volumetrische Energiedichte verringert sich von der Zelle über die Modulebene bis hin zum gesamten Batteriesystem, was bei zylindrischen Zellen durch die Leerräume im Package sowie der aufwändigen elektrischen Verschaltung begründet ist.

Aufbau Lithium-Ionen-Batteriesystem

Die Lithium-Ionen-Zellen bilden die Basiskomponenten des gesamten Systems. Ein Lithium-Ionen-Batteriesystem setzt sich neben den elektrochemischen Zellen aus einer Vielzahl mechanischer, elektrischer- und elektronischer Komponenten sowie einem Kühlsystem zusammen. Diese Hauptkomponenten sind in ihren Funktionen voneinander abhängig. Ein zentrales Batterie-Steuergerät übernimmt dabei die Funktion als Überwachungs- und Steuerungseinheit des Batteriesystems und wird deshalb auch als Batteriemanagementsystem (BMS) bezeichnet. Des Weiteren besitzt das BMS eine Schnittstelle zur Daten-Kommunikation mit dem Fahrzeug. Durch das elektrische- und thermische Management wird gewährleistet, dass die Lithium-Ionen-Zellen langfristig sicher und verlässlich betrieben werden können. Lithium-Ionen-Zellen stellen aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Fehlbedienungen sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Batteriemanagementsystems. [39]

Abbildung 2-8 zeigt einen typischen, heute üblichen, Aufbau eines Hochvolt-Batteriesystems von einem vollelektrisch betriebenen Fahrzeug.

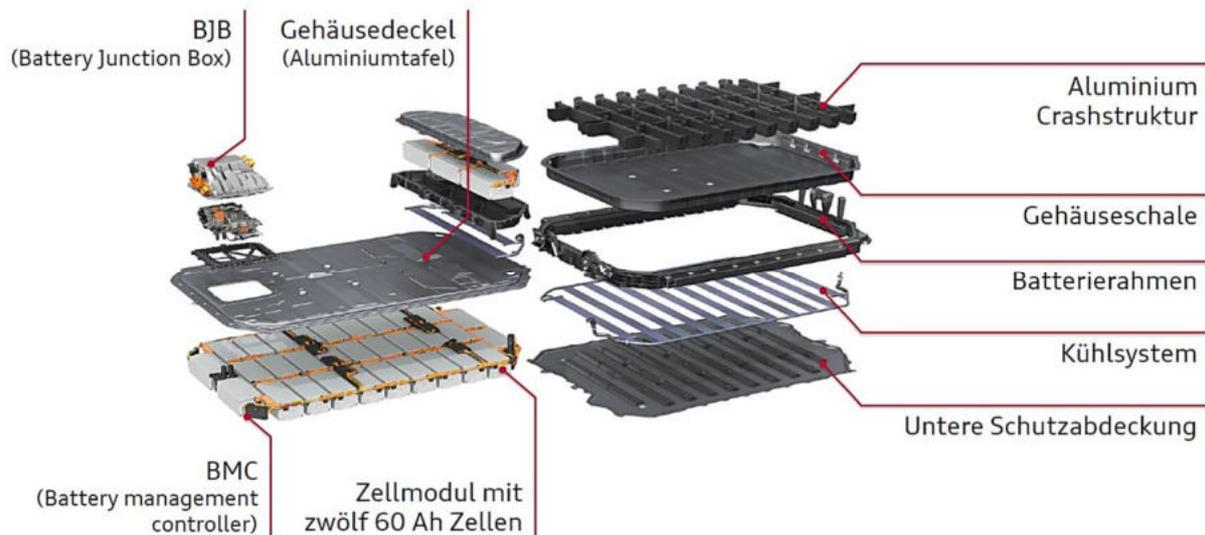


Abbildung 2-8: Grundlegender Aufbau einer Traktionsbatterie eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs von Audi [46]

Die gesamte Batterie ist dabei im Unterboden des Fahrzeugs und zwischen den Achsen untergebracht. Die Batteriemodule, die einzelne Lithium-Ionen-Zellen zu größeren Einheiten zusammenfassen, sind gemeinsam mit der Sensorik, dem Kühlsystem und den elektrischen Verschaltungen in ein abgedichtetes Batteriegehäuse eingebettet. Um die Kapazität der Gesamtbatterie zu erhöhen, sind einige Batteriemodule unter der Rücksitzbank auf einer zweiten Ebene des Batteriesystems angeordnet. [39]

Um die Sicherheit zu gewährleisten, darf die Fahrzeugbatterie während ihrer gesamten Lebensdauer oder bei einem Unfall nicht beschädigt werden, was im schlimmsten Fall zu einem Batteriebrand führen kann. Dazu sind alle Zellmodule in einzelnen Fächern der Aluminium-Crashstruktur untergebracht. Ein Strangpressprofil sorgt als Seitenschweller für einen robusten Batterierahmen. Dadurch wird eine hohe mechanische Festigkeit und Steifigkeit der Hochvoltbatterie erreicht. Darüber hinaus vervollständigt ein Unterfahrschutz das Crashkonzept des gezeigten Systems. [39]

Um die Lithium-Ionen-Zellen im optimalen Temperaturbereich von etwa 25 bis 35°C zu betreiben, ist ein leistungsfähiges Kühlsystem im Batteriesystem integriert. Die kühlwasserführenden Elemente sind dabei an der Gehäuseaußenseite verklebt, um somit im Crashfall maximale Sicherheit gegen Kühlmiteleintritt in den Innenraum der Batterie zu bieten. Über die Batterie-Anschlussbox (Battery-Junction-Box, BJB) wird die elektrische Energie des Batteriesystems zu den Hochvoltkomponenten im Fahrzeug verteilt. Die externe Energiezufuhr zum Laden der Hochvoltbatterie erfolgt ebenso über diese Anschlussbox. Außerdem sorgt diese im Falle einer Störung dafür, dass die Hochvoltverbindung vom Fahrzeug getrennt wird, um es stromlos zu machen. [39]

In Abbildung 2-9 ist der schematische Aufbau eines Lithium-Ionen-Batteriesystems dargestellt, welcher nachfolgend beschrieben werden soll.

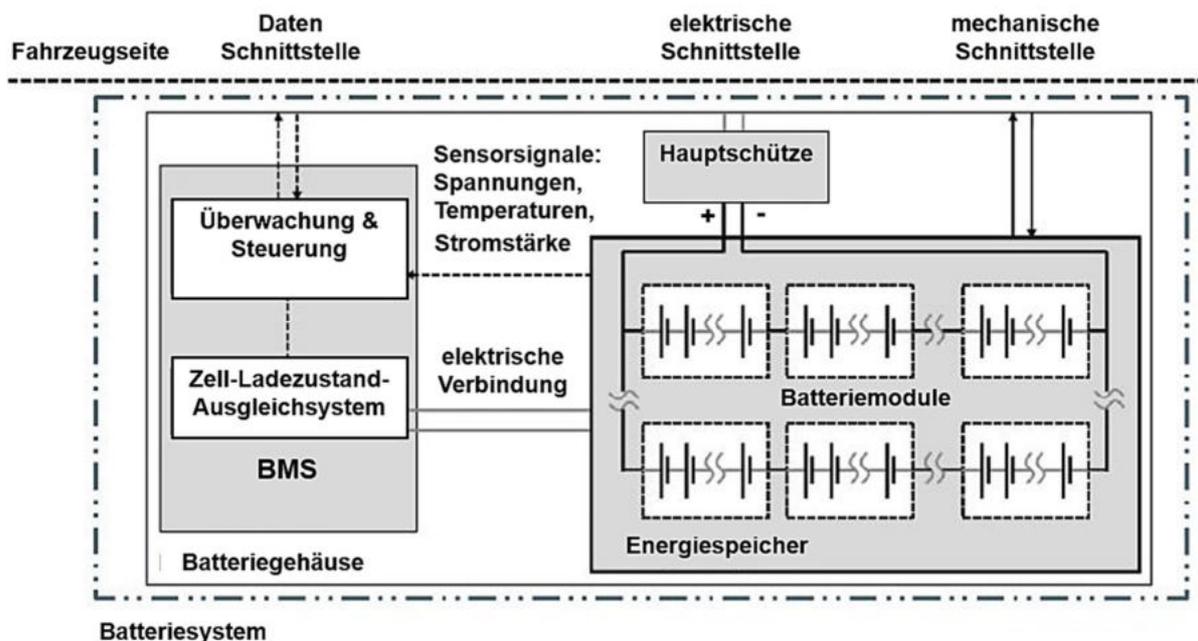


Abbildung 2-9: schematischer Aufbau eines Hochvolt-Batteriesystems [47]

Mechanischer Aufbau

Bei der Konstruktion von Lithium-Ionen-Batteriesystemen wird in mechanischer Sicht zwischen Block- und Modulbauweise unterschieden. Bei der Blockbauweise werden alle Lithium-Ionen-Zellen sowie

andere Komponenten, wie Sensoren, Kühleinheiten und Batteriemanagement in einem Block zusammengefasst. Dieser Block mit den zugehörigen Schaltkreisen und externen Komponenten wird anschließend in ein Batteriegehäuse integriert. Beim modularen Aufbau hingegen wird eine bestimmte Anzahl von Einzelzellen zu einem Modul zusammengeschaltet. Ein Modul hat in der Regel unter 60 Volt Gesamtspannung, sodass es ohne besondere Sicherheitsmaßnahmen handhabbar bleibt. Die Kombination der einzelnen Modul-Untereinheiten ergibt das Gesamtbatteriesystem. Die modulare Bauweise hat den Vorteil, dass die einzelnen Module bei der Montage leichter zu handhaben sind. Des Weiteren erleichtert der modulare Aufbau Wartungen sowie Reparaturen des gesamten Batteriesystems. Daher wird die Modulbauweise hauptsächlich für große Batteriesysteme von Batterieelektrischen- und Plug-In-Hybridfahrzeugen verwendet. Die Blockbauweise kommt vorwiegend bei kleinen Batteriesystemen zum Einsatz. [39]

Abbildung 2-10 zeigt ein Beispiel von einem Blockaufbau sowie ein Batteriemodul für die modulare Bauweise. Die zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen sind bei der Blockbauweise (links) zu einem 35-zelligen-Block verbunden, welcher den Kern des Mild-Hybrid-Batteriesystems bildet. Der Batterieblock ist umgeben von Kühleinrichtungen, Sensorik sowie dem Batteriemanagementsystem und dem Gehäuse. Das Batteriemodul in der rechten Abbildung besteht aus insgesamt zwölf einzelnen Pouch-Zellen, welche verschaltet in einem Aluminiumgehäuse untergebracht sind. [39]

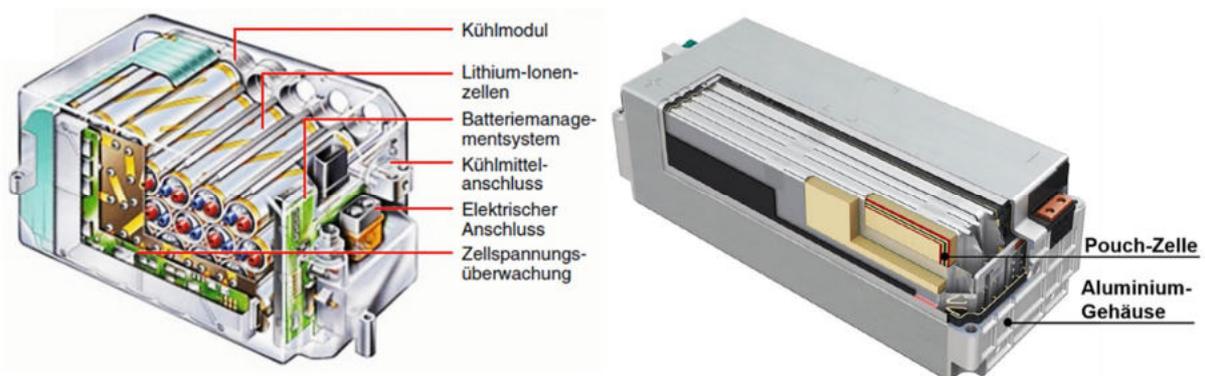


Abbildung 2-10: Mild-Hybrid-Serienanwendung einer Li-Ionen-Batterie von Mercedes Benz in Blockbauweise (links) Batteriemodul mit zwölf Pouch-Zellen von Audi (rechts) [32] [46]

Verschaltungsmethoden der Lithium-Ionen-Zellen

Um die geforderte Kapazität sowie Spannung des Batteriesystems zu erreichen, müssen eine Vielzahl von Einzelzellen elektrisch verschaltet werden. Zur Erhöhung der Spannungslage der Batterie ist die einfachste Ausführung die Serienschaltung von einzelnen Lithium-Ionen-Zellen. Dabei ergibt sich die Gesamtspannung als Summe der Zellenspannungen. Die Nennspannung der heute üblichen Zellen reicht von 2,2V bis zu 4,2V. Der Stromfluss bleibt bei rein in Serie geschalteten Zellen gleich. [39]

Bei einer Parallelschaltung werden mehrere in Serie geschaltete Einzelstränge parallel verschaltet, um dadurch den Stromfluss zu erhöhen. Die Spannungslage entspricht jener der Einzelstränge. Bei dieser Verschaltungsmethode ist die Überwachung der Zellspannung jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden, da jeder Strang individuell überwacht werden muss. Außerdem erfordert die Verschaltung der einzelnen Stränge ein übergeordnetes Batteriemanagementsystem, welches die Funktion der Einzelstränge koordiniert. Dazu sind Zellspannungs-Überwachungseinheiten der einzelnen Stränge und Module erforderlich. [39]

Die zweite Möglichkeit zur Verschaltung der Zellen im Batteriesystem besteht darin, zunächst Einzelzellen parallel zu schalten, sodass je nach Zellenanzahl eine erhöhte Kapazität bei gleicher Spannungslage resultiert. Diese parallel verschalteten Batteriemodule werden anschließend in Serie geschaltet. Ein großer Vorteil dieser Verschaltungsmethode ist die Möglichkeit der Gesamtüberwachung der Spannungslage im Batteriesystem. Bei unterschiedlichem Spannungsniveau in den Zellen gleicht das Batteriemanagementsystem bei Bedarf die Einzelspannungen aneinander an, sodass eine einheitliche Spannungslage bei gleichem Ladezustand der Lithium-Ionen-Zellen erreicht wird. Dieser Angleichungsprozess kann sowohl aktiv als auch passiv erfolgen. Bei einer passiven Anpassung werden alle Zellen durch Widerstandsentsladung auf den niedrigsten Wert der Zellspannung entladen. Die aktive Angleichung hingegen überträgt Ladung von Zellen mit höherer Ladung zu Zellen mit geringerer Ladung. Zur Überwachung der Zellen stehen typischerweise eigene Schaltkreise zur Verfügung. Die Serien- und Parallelschaltung von Lithium-Ionen-Zellen ermöglicht somit den flexiblen Aufbau des Batteriesystems, um die gewünschten Spannungs- und Kapazitätswerte mit einer Standardzellengröße zu erreichen. [39]

Bei Plug-In-Hybriden und rein batterieelektrischen Fahrzeugen hat sich eine Spannungslage von 350V-400V etabliert. Dieses Spannungsniveau wird durch eine Serienschaltung von ca. 90-100 Zellen erreicht. Einige Hersteller nutzten allerdings bereits ein 800-Volt-Traktionsbordnetz. Die Batteriekapazitäten sind abhängig von den jeweiligen Anforderungen der Fahrzeuge und betragen für batterieelektrische Personenkraftfahrzeuge typischerweise zwischen 30 und 100 kWh. [39]

Elektrische Verkabelung

Die Hochvoltverkabelung ist durch orangene Isolierung gekennzeichnet und verbindet die Batterie mit den Hochvoltverbrauchern und dem Ladegerät. Sie ist in der Regel mit Trennschaltern an den Plus- und Minuspol der Batterie angeschlossen. Innerhalb der Batterie sind die Module durch sogenannte „Busbars“ verbunden. Diese sind häufig als gebogene Kupferprofile ausgeführt. Zusätzliche pyrotechnisch oder mechanisch betätigte Trennschalter können zwischen den Zellmodulen angeordnet werden, um das Spannungspotenzial der gesamten Batterie weiter zu unterteilen. Um die Handhabung von Zellmodulen zu erleichtern, sollten diese eine maximale Spannung von weniger als 60 Volt aufweisen. Hochspannungsverbindungen werden in der Regel durch Schraubverbindungen ausgeführt, um einen möglichst geringen Innenwiderstand und Sicherheit gegen Lösen der Verkabelung zu gewährleisten. [39]

Überwachungskomponenten

Um das gesamte Batteriesystem bei optimalen Betriebsbedingungen zu betreiben, müssen viele Kenngrößen messtechnisch erfasst werden. Zur Überwachung der Spannungen von Zellen und Modulen werden Spannungsfühler eingesetzt. Die Zell- und Modultemperatur sowie die Temperatur des Kühlsystems werden mittels Temperatursensoren erfasst. Ein Stromsensor ist notwendig, um die Höhe des Stroms, welcher durch die Batterie fließt, zu messen. In der Regel wird eine Zellüberwachungselektronik in jedes Batteriemodul installiert, um damit die Zellspannungen sowie die Temperaturen zu erfassen. Die Überwachung jeder einzelnen Zellspannung ist erforderlich, da sich Über- und Unterspannungen negativ auf die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Zelle auswirken können. Die Messdaten werden von der Zellüberwachungselektronik über einen internen Systemdatenbus an das Batteriemanagementsystem weitergeleitet und dienen dort zur Charakterisierung des aktuellen Batteriezustandes. Die messtechnisch erfassten Größen sind auch notwendig, um daraus abgeleitete Kenngrößen zu ermitteln. So kann beispielsweise durch Messung von Stromstärke und Spannung über der Zeit die Ermittlung des aktuellen Ladezustands (SoC) der Batterie unterstützt werden. Je nach

Anwendungsfall können auch weitere Messdaten wie Feuchtigkeit oder Systemdruck innerhalb des Batteriegehäuses erfasst werden. Dies findet vor allem bei Batteriesystemen mit Flüssigkeitskühlung häufig Anwendung. [39]

Steuerungskomponenten

Das Basiselement der aktiven Batteriesteuerung bildet das Batteriemanagementsystem (BMS), in welchem alle empfangenen Daten verarbeitet werden. Daraus werden die für den Betrieb relevanten Kenngrößen, wie beispielsweise der aktuelle Ladezustand (SoC), Alterungszustand (SoH), Funktionsmöglichkeiten (SoF) oder die maximale elektrische Entlade- und Ladungsaufnahmekapazität ermittelt. Die Zellüberwachungselektronik hat neben der messtechnischen Funktion eine weitere aktive Aufgabe. Gesteuert durch das Batteriemanagementsystem (BMS) sorgt eine spezielle Schaltung dafür, dass die Zellen im Batteriesystem den gleichen Ladezustand aufweisen. Die batterieseitig untergebrachten Leistungsrelais (Hauptschütze), werden ebenfalls durch das Batteriemanagementsystem gesteuert. Diese Hauptschütze stellen die Verbindung zum Hochspannungsstecker her. Aus Sicherheitsgründen ist eine Hochvoltbatterie mit zwei Leistungsrelais, jeweils für Plus- und Minuspol, ausgeführt. Wenn die Batteriespannung an den Leistungsstecker angeschlossen wird, wird zunächst nur ein Relais geschaltet, während das andere zunächst auf die Betriebsspannung vorgeladen wird. Dadurch wird verhindert, dass die Leistungsrelais unter voller Systemspannung schließen, um ihre Langzeitstabilität nicht zu beeinträchtigen. [39]

Die Zuschaltung des Batteriesystems erfolgt nur im technisch einwandfreien Zustand von Batterie und Fahrzeug und wenn keine Störung vorhanden ist. Im Störfall, wie beispielsweise ein Isolationsdefekt, Kurzschluss oder eine defekte Zelle wird die Hochspannungsverbindung gesperrt. Zusätzlich kann je nach möglichen Störungsgrad auch eine sofortige oder zeitgesteuerte Abschaltung aus dem Betrieb erfolgen. Eine sofortige Abschaltung erfolgt zum Beispiel im Crash-Fall. Bei Auslösung eines Air-Bags im Fahrzeug werden die Leistungsrelais sofort, meist pyrotechnisch, automatisch geöffnet, um damit für eine Spannungsfreischaltung der Batteriepole zu sorgen. Beim externen Laden mit Gleich- oder Wechselstrom müssen die entsprechenden Relais ebenfalls zuerst geschlossen werden, um das Laden der Hochvoltbatterie zu ermöglichen. Darüber hinaus muss auch ein separates Relais für den Betrieb verschiedener Zusatzaggregate wie dem elektrischen Heizer oder der Klimaanlage geschlossen werden. Die Batteriesteuerungselektronik wird über das konventionelle 12-Volt-Bordnetz des Fahrzeugs versorgt, welches unabhängig vom Hochvoltbordnetz der Traktionsbatterie arbeitet. [39]

Schnittstellen

Die Kommunikation des Batteriesystems mit anderen Steuergeräten auf der Fahrzeugseite erfolgt in der Regel über eine CAN-Bus-Schnittstelle. Art und Umfang der ausgetauschten Daten hängen vom jeweiligen Fahrzeug ab. Typische Kenngrößen für die Datenübertragung an die Fahrzeugseite sind Ladezustand, Batteriekapazität und Betriebstemperatur. Darüber hinaus gibt es Daten wie beispielsweise den elektrischen Isolationswiderstand, der aus Sicherheitsgründen erforderlich ist. Im umgekehrten Fall erhält das Batteriesystem auch funktionsrelevante Informationen von der Fahrzeugseite. Solche Daten sind beispielsweise Signale für die Ein- und Abschalttroutinen des Batteriesystems sowie Signale, die eine sofortige Betriebsunterbrechung im Notfall sicherstellen. Als mechanische Schnittstelle stellt der Kühlmittelanschluss am Batteriegehäuse die Verbindung zum Thermomanagementsystem der Fahrzeugseite her. [39]

Zur Gewährleistung der Sicherheit, insbesondere für Service- und Wartungszwecke, wird häufig ein manueller Steckerkontakt (Service-Disconnect) verwendet. Je nach Hersteller ist dieser Schalter zumeist über den Kofferraum zu erreichen. Dadurch kann die Hochspannungsbatterie von außen manuell spannungsfrei geschaltet werden. [39]

Thermomanagement

Die erfassten Temperaturdaten dienen zur Steuerung des Batterie-Kühlsystems und zur Verhinderung thermischer Überlastungen. Bei einem System, das auf einer Flüssigkeit als Kühlmedium basiert, betrifft dies im Regularbetrieb die Regelung der Durchflussmenge sowie die Kühlflüssigkeitstemperatur. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen stellt die Schnellladung die größten Herausforderungen an das Kühlsystem. Daher ist eine aktive Kühlung des Batteriesystems erforderlich, die grundsätzlich durch die Anbindung an den Kältemittelkreislauf der Fahrzeug-Klimaanlage erreicht wird. Dabei kann die Batterieabwärme je nach Ausführung über klimatisierte Luft, direkt über das Kältemittel aus dem Kältemittelkreislauf oder über einen separaten Kühlmittelkreislauf abgeführt werden. [39]

Durch eine geeignete Auslegung und Gestaltung des thermischen Systems kann der Flüssigkeitskreislauf auch zur Erwärmung der Hochvoltbatterie verwendet werden. Dies ist vor allem bei niedrigen Umgebungstemperaturen von Vorteil, da das Batteriesystem so schneller den optimalen Betriebsbereich erreichen kann. [39]

Batteriegehäuse und Befestigungssystem

Das Batteriegehäuse dient zur Unterbringung der aktiven und passiven Komponenten eines Hochvolt-Batteriesystems. In Bezug auf die Funktionalität, Sicherheit und Lebensdauer des Energiespeichers spielt das Gehäuse der Batterie eine entscheidende Rolle. Es dient als Abschirmung der empfindlichen Bauteile vor schädlichen Umwelteinflüssen wie Wasser, Feuchtigkeit sowie von Staub und ist damit entscheidend für einen langfristig sicheren und zuverlässigen Betrieb des Batteriesystems. Dadurch, dass Traktionsbatterien typischerweise außerhalb der Fahrzeugkabine, zumeist zwischen den Achsen im Unterboden, untergebracht sind, ist das Batteriegehäuse herausfordernden Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Wasser, Salznebel, Temperatur und Steinschlag direkt ausgesetzt. Hohe mechanische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit sind daher entscheidend. [39]

Zusätzlich zu diesen Umwelteinflüssen sind die inneren und äußeren Befestigungssysteme hohen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Dabei müssen alle Belastungen aus der Fahrdynamik und Erschütterungen dauerhaft ertragen werden. Im Crashfall müssen große Verformungen und Bruch des Gehäuses ausgeschlossen werden, um Kurzschlüsse innerhalb der Batterie zu vermeiden. Als weitere Sicherheitseinrichtung wird eine Überdrucköffnung typischerweise an der Oberseite des Batteriegehäuses verbaut, um Druckschwankungen innerhalb der Batterie auszugleichen und zur druckgesteuerten Notentriegelung von Überdruck durch schädliche Gase im System. [39]

Wartung und Zerlegbarkeit

Aufgrund des hohen Gesamtgewichts und der in der Regel verwendeten Klebedichtungen erschwert ein großes Gehäuse die Wartung und das Öffnen des Gehäuses. Für den Austausch von Modulen und die einfache Demontage ist die Möglichkeit der Aufteilung in Niederspannungskomponenten unter 60 Volt von Vorteil, da dies die Handhabung durch das Wartungspersonal erheblich vereinfacht. Manche

Hersteller verfolgen die Strategie, dass eine Batterie überhaupt nicht zerstörungsfrei zerlegt und gewartet werden kann. [39]

Batteriesicherheit

Bei der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien hat die Sicherheit oberste Priorität. Dies ist vor allem auf die Brennbarkeit des Elektrolyten sowie die reaktiven Elektrodenmaterialien zurückzuführen. Die Hauptrisikquelle ist das thermische Durchgehen einer Lithium-Ionen-Zelle. Je nach verwendeter Zellchemie beginnt die Selbsterhitzung bereits ab 70°C, was zu einer Verdampfung des Elektrolyten führt und dadurch einen Druckanstieg in der Zelle auslöst. Durch weiter steigende Temperaturen kommt es zur Schmelzung des Separators. Es entstehen interne Kurzschlüsse und es kommt zum thermischen Durchgehen der Zelle, auch engl. „thermal runaway“ genannt. Dieser Vorgang beschreibt eine unaufhaltsame exotherme Reaktion, welche von den chemischen Zellmaterialien gespeist wird. Nachdem Beginn des Durchgehens können Zellen innerhalb weniger Augenblicke explodieren. Bei Zellen mit Lithium-Eisenphosphat (LFP) als Kathodenmaterial beginnt die Selbsterhitzung erst ab einer Temperatur von 110°C bis 120°C. Neuere Zellenentwicklungen nutzen Materialien mit deutlich verbesserter thermischer Stabilität, sodass ein unkontrolliertes Durchgehen kaum mehr provoziert werden kann. [53] [54]

Eine Beschädigung des Batteriesystems kann durch unterschiedliche Ereignisse ausgelöst werden, welche, angefangen von Leistungs- und Kapazitätsverlusten, bis hin zur Zerstörung der Zelle beziehungsweise des Batteriesystems führen kann. In Abbildung 2-11 sind die verschiedenen Auslöser sowie der Ablauf der thermischen Zersetzung dargestellt.

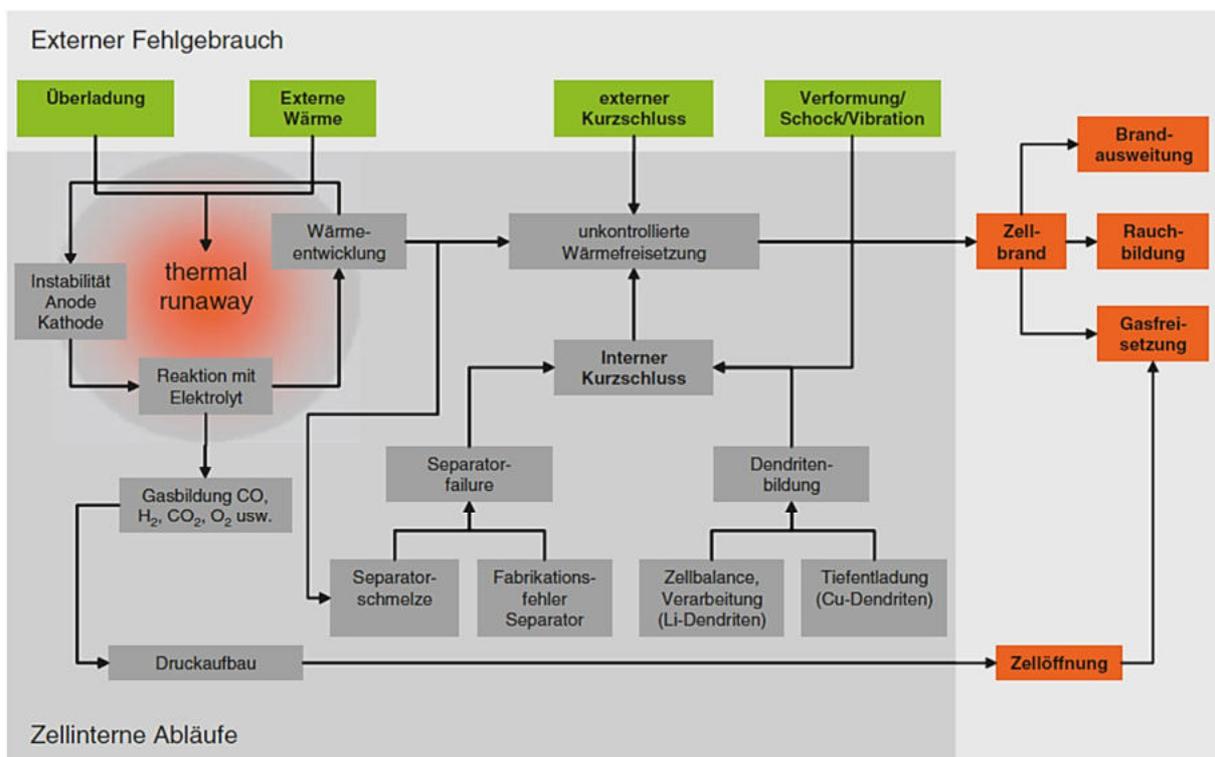


Abbildung 2-11: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung eines Lithium-Ionen-Batteriesystems [39]

Bei Lithium-Ionen-Zellen bewirkt eine Überladung eine Zersetzung des Elektrolyten. Dieser Prozess ist unumkehrbar und kann eine Zerstörung der Zelle bewirken. Weitere externe Auslöser können elektrische, thermische und mechanische Fehlgebrauche sein. Es können aber auch interne Auslöser

wie metallische Verunreinigungen, defekte Separatoren sowie Lithiumablagerungen auf der Anode zur Zellersetzung führen. Als Ergebnis resultiert, unabhängig von der Art des Auslösers, in erster Linie ein Anstieg der Zelltemperatur. Dieser Temperaturanstieg führt zur thermischen Zersetzung von Zellkomponenten sowie zu einer weiteren Wärmeentwicklung, welche wiederum die Kettenreaktionen auslösen kann. Die Folgen eines thermischen Durchgehens sind oft eine unkontrollierte Erhitzung der Zelle und im schlimmsten Fall ein Zellbrand, der weitere Nachbarzellen anstecken kann. Dies führt zu Brandausbreitung, Rauchbildung und Gasfreisetzung. [39]

Eine wesentliche Gefahrenquelle stellt die Überhitzung oder die Überladung der Zellen während dem Fahrbetrieb oder dem Ladevorgang dar. Mögliche Fehler in der Zell- oder Modulebene sowie auch im Batteriemanagement können eine Zelle im Fahr- oder Ladezustand mit zu hohen Strömen belasten. Bei hohen Strömen entstehen hohe Verlustleistungen, die bei unzureichender Kühlung zu einer unzulässigen Zellerwärmung führt und so zu einem Durchgehen führen können. In diesem Fall kann dadurch auch die benachbarte Zelle so weit erhitzt werden, dass diese ebenfalls zu brennen beginnen. Durch die auftretende Kettenreaktion der nach und nach entzündenden Zellen kann ein Brand der Batterie bis zu ca. einer halben Stunde andauern. Natürlich hängt die Brenndauer- und Temperatur vom Ladezustand, der Zellchemie sowie von der Zellenkonstruktion ab und kann daher nicht pauschal angegeben werden. [39]

Eine Besonderheit ist dabei, dass bei der Verbrennungsreaktion kein Luftsauerstoff von der Umgebung notwendig ist. Der zur Verbrennung erforderliche Sauerstoff ist bereits in Form von Oxiden an der Kathode in der Zelle vorhanden. Die Freisetzung von Sauerstoff aus den Oxiden macht das Durchgehen erst möglich. Diese Sauerstofffreisetzung erschwert folglich auch die Lösbarkeit von Batteriebränden, da ein einfacher Ausschluss von Sauerstoff solche Brände nicht löscht. Verkehrsunfälle und Kurzschlüsse sind ein weiteres Gefahrenpotenzial für das thermische Durchgehen der Zellen. Die Gefahr von Kurzschlüssen besteht durch große Verformungen und dem Eindringen von Gegenständen in eine Zelle. Kurzschlüsse können auf Batterie-, Modul-, oder Zellebene auftreten und zu hohen Strömen und damit zur Erwärmung einer oder mehrerer Zellen führen. Kurzschlüsse können auch erst mehrere Tage nach einem Unfall auftreten und so einen Batteriebrand auslösen. [39]

Eine Tiefentladung der Zelle kann durch Bildung von sogenannten Dendriten an der Anode ausgelöst werden. Aus dem kupfernen Stromsammel gehen die Kupfer-Ionen in Lösung, wodurch es bei erneuter Ladung zur Bildung dieser Dendriten kommt. Wenn ein Dendrit den Separator durchdringt, führt dies in der Regel zu einem lokalen Kurzschluss in der Zelle. Dieser bewirkt oft eine vollständige Selbstentladung der Zelle oder im schlimmsten Fall eine interne thermische Kettenreaktion, was zu einem Brand führen kann. Beim Ladezustandsausgleichsprozess der Zellen kann es ebenfalls zur Bildung von Dendriten kommen. [39]

Die Entstehung des thermischen Durchgehens durchläuft mehrere Stufen, wodurch die Reaktionen in Abhängigkeit der jeweiligen Temperatur auftreten, siehe Tabelle 2-4. Diese Reaktionen laufen in der Regel innerhalb weniger Minuten ab und können von außen nicht gestoppt werden. Es sei angemerkt, dass die Abkürzung „LiB“ für Lithium-Ionen-Batterie steht.

Temperatur	Ereignis und Bemerkungen
60 °C	<ul style="list-style-type: none"> Die meisten LiB-Zellen sind nicht für Betriebs- und Lagertemperaturen über 60 °C ausgelegt.
70–90 °C	<ul style="list-style-type: none"> Die meisten handelsüblichen LiB-Zellen zeigen Selbsterhitzung bei Temperaturen ab etwa 80 °C bei 100 % SOC (state of charge) (130 °C bei 0 % SOC). Zersetzung der SEI-Grenzschicht (solid-electrolyte-interface); exotherme Reaktion und Gasbildung durch Elektrolytzersetzung Tiefsiedende Bestandteile im Elektrolyt beginnen oberhalb von 80 °C zu verdampfen und führen zum Druckaufbau, der die Zellen bersten lassen kann. Bei Untersuchungen wurde festgestellt, dass handelsübliche LiB-Zellen Selbsterhitzungsverhalten zeigen. Werden sie auf 80 °C erwärmt und dann unter adiabatischen Bedingungen gelagert, kann es zu einem Thermal Runaway kommen. Bei zylindrischen Zellen vom Typ 18650 dauerte dies bei 100 % SOC etwa 2 Tage.
130–150 °C	<ul style="list-style-type: none"> Separator aus PE, PP oder PE/PP verschließt die Poren (shutdown)
> 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> Separator schmilzt, zusätzliche Erwärmung aufgrund von partiellem Kurzschluss
130–250 °C	<ul style="list-style-type: none"> Beginn exothermer Reaktion des sich zersetzenden Kathodenmaterials mit dem Elektrolyten Freisetzung von geringen Mengen Sauerstoff (Lithiumeisenphosphat ist thermisch stabil; keine Desorption von Sauerstoff und exotherme Reaktion mit dem Elektrolyten) Druckanstieg in der Zelle durch Verdampfung und Zersetzung des Elektrolyts Aufblähen von Pouchzellen und Öffnen prismatischer Zellen Rundzellen haben eine Entlüftungseinrichtung im Deckel (Auslösen bei einem Druck von ~ 14 bar) austretende Zersetzungsgase sind zündfähig, allerdings noch nicht selbstentzündlich – ausreichend Sauerstoff und Zündquelle sind erforderlich
400–500 °C	<ul style="list-style-type: none"> Selbstzündung des Elektrolyten in atmosphärischer Umgebung
> 600 °C	<ul style="list-style-type: none"> Schmelzen des Aluminium-Stromableiters (Kathode) Legierungsbildung des flüssigen Aluminiums mit dem Kupfer-Stromableiter (Anode)

Tabelle 2-4: Temperaturphasen des Thermal-Runaways und seine Folgen [42]

In Folge der Verbrennungsreaktion der Batteriezelle entstehen Gasgemische, deren Zusammensetzung vorwiegend von der Zellchemie, Ladezustand (SoC) und Umgebungsbedingungen bestimmt wird. Tabelle 2-5 liefert eine Übersicht der Reaktionsprodukte und die dazugehörigen Eigenschaften laut GHS (Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien). Die H-Sätze (Hazard Statement) sind als Gefahrenhinweise zu verstehen. Mit Hilfe der H-Sätze wird die Gefahr, die von den chemischen Stoffen und Materialien ausgeht, im Detail dargestellt. So handelt es sich beispielsweise bei der Bezeichnung „H220“ um ein extrem entzündbares Gas.

Den Hauptbestandteil der Reaktion bildet mit etwa 60-70% Kohlenmonoxid. Es ist ein farbloses, geruchloses, geschmackloses und vor allem giftiges Gas. Die Entstehung dieses toxischen Gases ist hauptsächlich auf die unvollständige Verbrennung bei Sauerstoffmangel von kohlenstoffhaltigen Substanzen zurückzuführen. Kohlenmonoxid ist schwerer als Luft, daher sollten bei Gasaustritt in geschlossenen Räumen diese sofort verlassen und der Raum mit Frischluft gespült werden. [55]

Reaktionsprodukt	Eigenschaften entsprechend GHS
Benzene (C ₆ H ₆) 	H225 H304 H315 H319 H340 H350 H372 H412 bei Einmalgabe liegt die tödliche Dosis von Benzol für Menschen bei 125 mg/kg (= 10 ml/70 kg)
Styrole (C ₈ H ₈) 	H226, H315, H319, H332, H372, H361d Ingestion: LC ₅₀ bei Ratten: 5.000 mg/kg, bei Mäusen: 316 mg/kg
Flusssäure (HF) 	H300, H310, H330, H314, H318 eine Tonne Batterien setzt zwischen 6-48 kg HF frei; tödliche Dosis: 20 mg/kg Körpergewicht
Salzsäure (HCl) 	H300, H310, H330, H314, H318 30-min LC ₅₀ bei Ratten: 4.700 ppm, bei Mäusen: 2.600 ppm
Kohlenmonoxid (CO) 	H220, H331, H372, H360d 30-min LC ₅₀ bei Menschen: 3.000 ppm
Difluorphosphorsäure (HPO ₂ F ₂) 	H314 thermisch und hydrolytisch instabil, bei Kontakt mit Wasser entstehen HF und H ₃ PO ₄

Tabelle 2-5: Übersicht der gasförmigen Verbrennungsprodukte bei Selbstzerstörung der Batteriezelle [42]

Die Entwicklung eines Batteriesystems basiert auf der konsequenten Berücksichtigung der chemischen,- elektrischen- und mechanischen Sicherheit. Bei der Zellauswahl soll beispielsweise die sicherste Chemie sowie sicherste Zellkonstruktion verwendet werden. Auf Modulebene müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Ausbreitung eines Zellbrandes auf die benachbarte Zelle zu verhindern. Um die elektrische Sicherheit zu gewährleisten, erfolgt der Schutz auf Batterieebene über das Batteriemanagementsystem. Dieses schaltet das Batteriesystem im Falle eines externen Kurzschlusses oder Isolationsfehlers ab. Darüber hinaus sollte das Batteriemanagementsystem ein zulässiges Spannungsfenster für jede Zelle sicherstellen sowie elektrische und thermische Überlastungen unterbinden. Die mechanische Sicherheit betrifft die Konstruktion des Batteriegehäuses und alle dazugehörigen Elemente und Komponenten, welche zum Unfallschutz des Gesamtsystems beitragen. [32]

Um die erforderliche Sicherheit nachzuweisen, muss ein neu entwickeltes Batteriesystem eine Vielzahl an international genormten Tests durchlaufen, bevor es die Typengenehmigung erlangt. Jede Batterie muss zuerst genehmigt werden, bevor sie in einem Fahrzeug oder einer anderen Anwendung in Betrieb genommen wird.

Teststart	Mechanisch							Thermisch			Elektrisch		
Test / Norm	Vibration	Mechan. Schock	Mechan. Integrität	Penetration	Falltest	Überrolltest	Höhensimulation	Therm. Schocktest	Übertemperatur	Feuerbeständigkeit	Kurzschluss	Überladen	Tiefentladen
ECE R100	X	X	X					X	X	X	X	X	X
ECE R136*	X	X			X			X	X	X	X	X	X
UN T 38.3	X	X	X				X	X			X	X	X
IEC 62281	X	X	X		X		X	X			X	X	X
IEC 62660-2	X	X	X					X	X		X	X	X
IEC 62660-3	X	X	X					X	X		X	X	X
ISO 6469											X		
SAE J2464		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X

* Zusätzlich werden Wasserdichtheit und Spannungsfestigkeit geprüft.

Tabelle 2-6: Missbrauchstests für Batteriesysteme zur Typengenehmigung [56]

Für die Genehmigung müssen definierte Missbrauchstests erfolgreich absolviert werden. Die Normen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Testdurchführung als auch hinsichtlich der zu bestehenden Tests. Auf Grundlage dieser Tests sollen die Konstruktion sowie die verwendeten Materialien der Batterie überprüft und falls erforderlich nochmals optimiert werden. Tabelle 2-6 zeigt in Abhängigkeit der jeweiligen Norm welche Tests zu absolvieren sind. Die Norm ECE R100 ist für die Fahrzeugklasse M (Personenbeförderungsfahrzeuge) und N (Nutzfahrzeuge) gültig und die Norm ECE R136 ist für Fahrzeuge mit der Klasse L (leichte Kraftfahrzeuge) anzuwenden. Zur detaillierten Beschreibung dieser Missbrauchstests ist die angeführte Literatur zu verwenden. [56]

Ausgeführte Batteriesysteme

Nachfolgend werden einige am Markt verfügbare Batteriesysteme von vollelektrischen Fahrzeugen beschrieben und die wichtigsten Batterie-Kenngrößen zusammengefasst. Die Hochvoltbatterien unterscheiden sich sowohl bei den verwendeten Zelltypen als auch bei der Fahrzeugklasse. Demzufolge ergeben sich auch Unterschiede in Bezug auf den Gehäuseaufbau, das Crashkonzept sowie das Thermomanagementsystem. Abschließend wird als Vergleich der Aufbau einer Hochvoltbatterie von einem Plug-In-Hybridfahrzeug beschrieben. Die nachfolgenden Batteriesysteme haben jedoch keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung der Ausführungsmöglichkeiten. Folgende Fahrzeuge werden dabei herangezogen:

- **BMW i3** als Kompaktwagen seit 2013 am Markt
- **Tesla Model 3** als Mittelklasse-Fahrzeug seit 2017 am Markt
- **Audi e-tron** als SUV-Fahrzeug (Geländewagen) seit 2018 am Markt
- **VW Golf GTE Plug-In-Hybrid** als Kompaktklasse seit 2014 am Markt

Die nachfolgende Tabelle 2-7 zeigt eine Übersicht über die Zellenauswahl, Verschaltung der Zellen, Gesamtgewicht sowie die Energieinhalte und Gesamtspannungslagen der ausgewählten Batteriesysteme. Die Bezeichnungen „s“ und „p“ werden verwendet, um zu beschreiben, wie viele Zellen in Serie (s) und parallel (p) geschaltet sind. Beispielsweise bedeutet 3s4p, dass es 4 parallele Stränge gibt, wobei pro Strang 3 Zellen in Serie geschaltet sind. Die angeführten Daten stammen aus einer Zusammenstellung von Fahrzeugrecherchen, Testberichten, Bedienungsanleitungen und Veröffentlichungen der Hersteller. Die Daten wurden sorgfältig erhoben und überprüft – die Korrektheit der Daten können jedoch nur die Hersteller garantieren. [45]

	BMW i3 3.Generation	Tesla Model 3 Longe Range	Audi e-tron
Zellenausführung Hersteller	prismatische Zelle von Samsung SDI	zylindrische Zelle von Panasonic/Tesla	Pouch-Zelle von LG Chem
Kathodenmaterial	Lithium-Nickel-Mangan- Cobalt-Oxide	Lithium-Nickel-Cobalt- Aluminium-Oxide	Lithium-Nickel-Mangan- Cobalt-Oxide
Einzelspannung	3,7 V	3,65 V	3,7 V
Anzahl Module	8x 12s1p	2x 23s46p 2x 25s46p	36x 3s4p
Gesamtkonfiguration	96s1p	96s46p	108s4p
Energieinhalt (brutto) Energieinhalt (netto)	42,2 kWh 37,9 kWh	79 kWh 75 kWh	95 kWh 83,6 kWh
Nennspannung	352 V	351 V	396 V
Gewicht	274 kg	478 kg	699,4 kg

Tabelle 2-7: Vergleich von spezifischen Kenngrößen der Batteriesystem der ausgewählten Fahrzeuge [45]

In Abbildung 2-12 ist das Hochvolt-Batteriesystem der ersten Generation des BMW i3 dargestellt. Mittlerweile wird die Batterie in seiner 3.Generation im Fahrzeug verbaut. Seit dem Jahr 2013 konnte die nutzbare Batteriekapazität (netto) von 18,8 kWh auf 37,9 kWh in der Version vom Jahr 2018 verdoppelt werden. Die Größe der Lithium-Ionen-Zellen und des Gesamtpackages blieb dabei unverändert. Bei gleichem Platzbedarf nahm das Gewicht der Zellen dabei nur unwesentlich zu. Dies ist hauptsächlich auf das geänderte Kathodenmaterial der Zelle von Material Lithium-Mangan-Oxid (2013) auf LNMCO (2018) zurückzuführen.

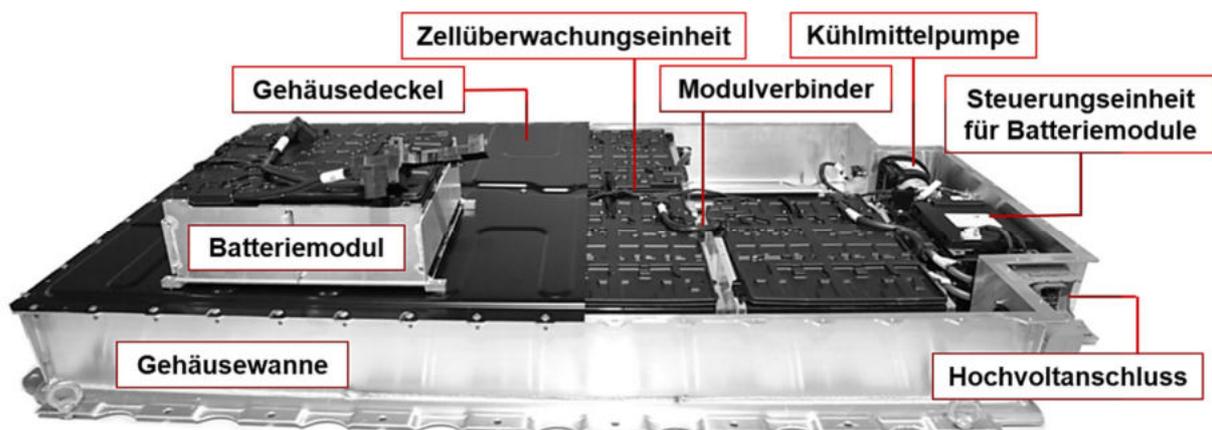


Abbildung 2-12: Batteriesystem des BMW i3 der ersten Generation [48]

Das Batteriesystem setzt sich aus 8 Modulen mit insgesamt 96 Lithium-Ionen-Zellen in prismatischer Ausführung zusammen und erreicht dabei eine Kapazität (brutto) von 42 kWh. Die geschweißte Batteriewanne aus Aluminium ist dabei im Fahrzeugboden untergebracht. Das Thermomanagementsystem verläuft unter den Batteriemodulen innerhalb der Gehäusewanne. Zur Wärmeabfuhr aus den Zellen wird eine indirekte Kühlung mit Kältemittel aus der Fahrzeugklimaanlage eingesetzt. Als seitlichen Batterieschutz dienen spezielle Strangprofile, welche bei einem Seitencrash die resultierenden Kräfte aufnehmen. Vor den Strangprofilen sind seitliche Schwellen mit wabenartigen Innenkreisen zur Energieabsorption vorgesetzt. [48]

Abbildung 2-13 zeigt die Fahrzeugarchitektur des Tesla Model 3 mit dem in Rot gekennzeichneten Hochvoltbatteriesystem. Des Weiteren sind auch die elektrische Maschine an der Hinterachse, der Klimakompressor über den Vorderrädern sowie die Ladeschnittstelle für die externe Nachladung der Batterie ersichtlich. Tesla verfolgt bei der Wahl der Lithium-Ionen-Zellen einen eigenen Weg und verwendet dabei Zellen mit zylindrischem Aufbau. Eine weitere Besonderheit, die in allen Tesla-Modellen umgesetzt wird, ist die Unterbringung der wichtigsten elektronischen Komponenten des Batteriesystems in einem kompakten Gehäuse auf einer zweiten Ebene des Batteriepacks. Dieses zusätzliche Gehäuse ist durch Entfernen der Rücksitzbank vom Fahrzeuginnenraum einfach zugänglich.

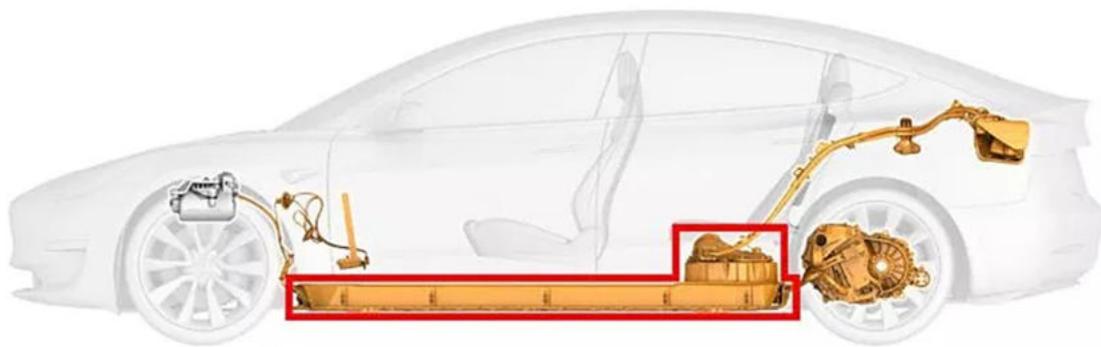


Abbildung 2-13: Fahrzeugarchitektur des Tesla Model 3 mit Batteriesystem im Unterboden (rot markiert) [49]

In Abbildung 2-14 sind die Batteriemodule mit den zylindrischen Zellen im Tesla Model 3 dargestellt. Das Batteriesystem weist bei Standardausführung einen Energieinhalt von 50 kWh auf und besteht aus insgesamt 2.976 zylindrischen Einzelzellen vom Typ 21700 ($\varnothing 21\text{mm}$ und Länge von 70mm).

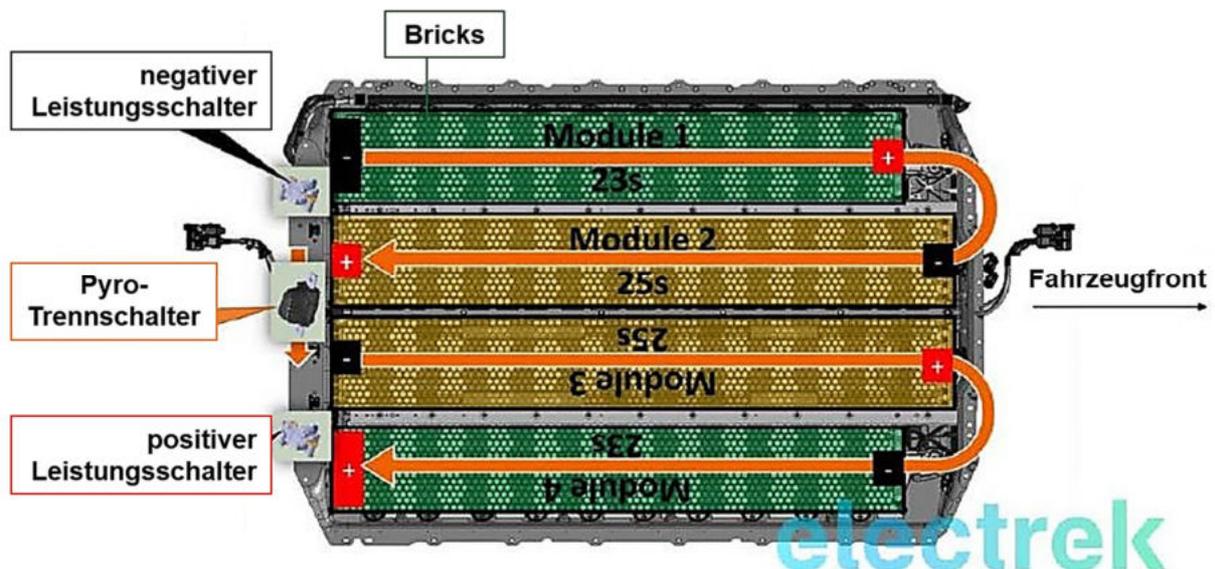


Abbildung 2-14: Batteriemodule des Tesla Model 3 [50]

Die einzelnen Zellen werden zu sogenannten „Bricks“ von je 31 Zellen zusammengeführt. Diese Bricks sind in vier separaten Modulen untergebracht, wobei die beiden äußeren Module jeweils 23 Bricks und die beiden inneren Module jeweils 25 Bricks enthalten. Zur Überwachung der einzelnen Zellen kommt je Modul eine Zellüberwachungselektronik zum Einsatz. Das Model 3 ist auch mit einem größeren Batteriesystem erhältlich. Dieses besitzt einen Energieinhalt (brutto) von 75 kWh bei 4.416 Einzelzellen, welche wiederum in Bricks und in Modulen untergebracht sind. [50]

Das Batteriegehäuse besteht aus einer flachen Batteriewanne mit zwei massiven Längsträgern. Als Seitencrashschutz befinden sich über dieser Wanne Querträger. Auf den Modul-Unterseiten befinden sich Glimmerplatten, welche gute elektrische Isolierungs- sowie gute Wärmeleiteigenschaften aufweisen. Als Temperaturregelungskonzept kommen hier sehr dünne Aluminium-Kühlbänder zum Einsatz, welche sich durch die stehenden zylindrischen Zellen schlängeln. Zur Wärmeabfuhr sind diese dünnen Wärmeleitbänder mit fluiddurchströmten dünnen Kunststoffrohren gekoppelt. Als Kühlmedium kommt ein Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz, welches im Vergleich zu einfachem Wasser den Gefrierpunkt herabsenkt. Ein großer Vorteil dieses Kühlkonzeptes ist das geringe Gewicht und der geringe Platzbedarf. [50]

Abbildung 2-15 zeigt das Schnittmodell des Hochvolt-Batteriesystems des Audi e-trons. Das Batteriesystem besteht aus 36 Zellmodulen mit jeweils 12 Pouch-Zellen. Das bedeutet, es sind insgesamt 432 Pouch-Zellen verbaut. Das Gesamtgewicht dieser Batterie beträgt dabei knapp 700 kg. Eine vierfache Parallelschaltung von 108 Zellen in Serie ergibt eine Gesamtkonfiguration von 108s4p mit einer Kapazität von 240 Ah und einem Bruttoenergieinhalt von 95 kWh. [51]

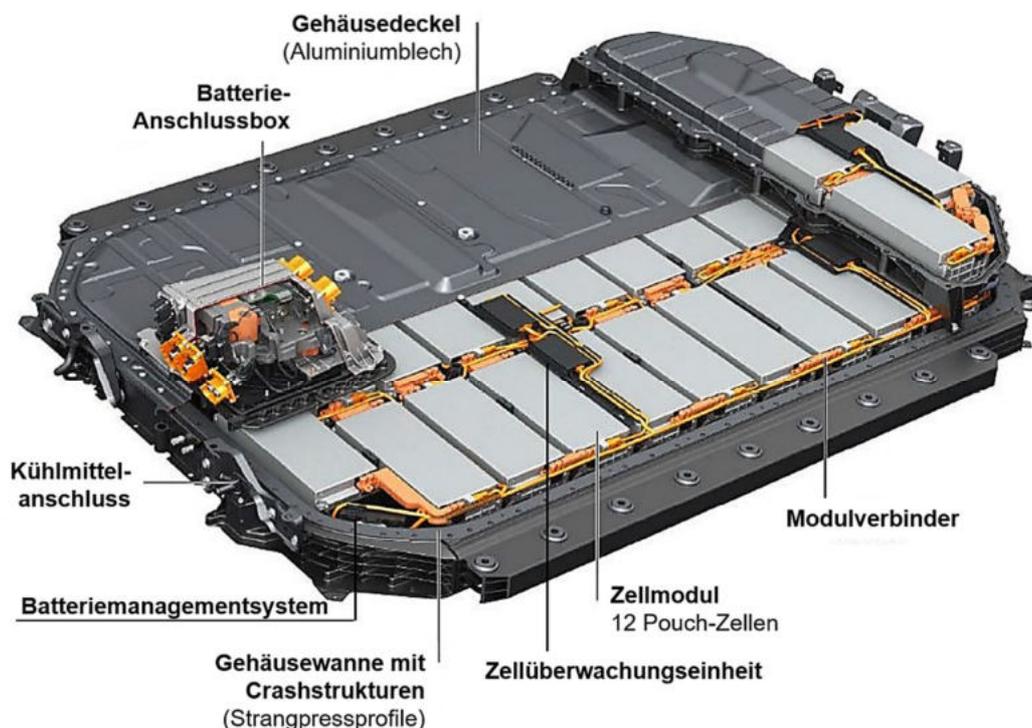


Abbildung 2-15: Schnittmodell der Hochvolt-Batteriesystems des Audi e-tron [51]

Auch hier wird der Bereich unter der Rücksitzbank genutzt, allerdings zur Unterbringung zusätzlicher Batteriemodule. Zur Überwachung der Zellen sind insgesamt zwölf Zellüberwachungseinheiten im

System integriert. Die Batteriegehäusewanne besteht aus Aluminium und ist mit einem crashsicherem Strangpressprofil-Rahmen ausgestattet. Die einzelnen Module sind dabei in den einzelnen Fächern der Fachwerkstruktur untergebracht. Diese Struktur sorgt für eine optimale Durchleitung von Längs- und Querkraften. Das Gehäuse ist dabei so ausgeführt, dass auch prismatische Lithium-Ionen-Zellen verbaut werden können. Das Kühlsystem ist außen am Gehäuse verklebt, um im Crashfall maximale Sicherheit gegen Kühlmiteleintritt in den Innenraum der Batterie zu bieten. Die Wärme wird dabei quer zum Batteriesystem über fluiddurchströmende Aluminium-Strangpressprofile abgeführt. Auch hier kommt als Kühlmedium ein Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz. [51]

Bei Blick auf die Gehäusekonzepte der gezeigten Fahrzeuge setzen alle Hersteller durchwegs auf eine Gehäusewanne mit rechteckähnlicher Grundfläche, die sich aus einer Ober- und einer Unterschale zusammensetzt. Als Randabdichtung zwischen Batteriewanne und Gehäusedeckel kommt in der Regel eine aufgespritzte Butyldichtung zum Einsatz. Da im Falle eines Unfalls möglichst wenig resultierende Kräfte in das Batteriesystem geleitet werden sollen, werden je nach Hersteller unterschiedliche Crashkonzepte umgesetzt. Die Konzepte reichen von einer annähernd vollständigen Kraftumleitung um das Batteriegehäuse bis hin zu einer teilweisen Krafteinleitung in das Gehäuse über integrierte oder aufgesetzte Strukturen, die für diesen Zweck ausgelegt sind. [51]

Als Vergleich zu den Batteriesystemen bei vollelektrischen Fahrzeugen zeigt Abbildung 2-16 den Aufbau der Hochvoltbatterie des VW Golf Plug-In-Hybrid. Diese setzt sich aus den Zellmodulen, der Anschlussbox, dem Kühlsystem und dem Batteriemanagementsystem zusammen, welche kompakt in ein gemeinsames Gehäuse integriert sind. Das Batteriegehäuse besteht dabei aus einer Aluminium-Druckguss-Unterschale sowie aus einer gedämmten Kunststoff-Oberschale. Die Verbindung zum Fahrzeug erfolgt über fünf Befestigungspunkte. [52]

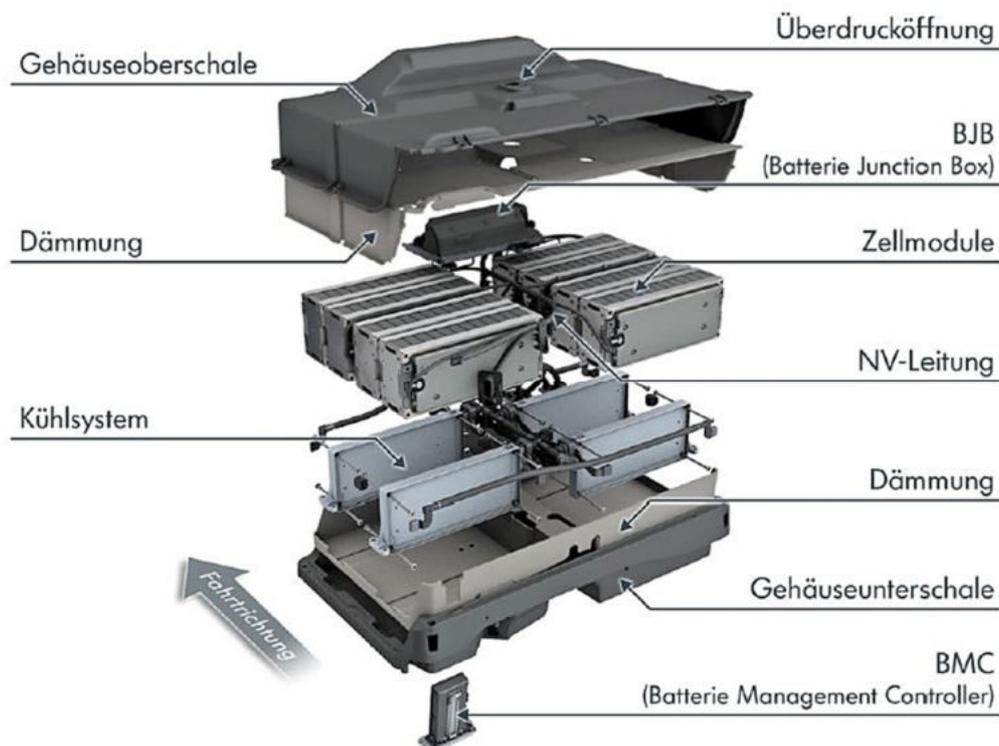


Abbildung 2-16: Aufbau der Hochvoltbatterie des VW-Golfs Plug-In Hybrid [52]

Das Batteriesystem besteht aus 8 Modulen mit jeweils 12 Einzelzellen in prismatischer Ausführung. In jedem Modul ist auch eine Zellüberwachungselektronik integriert, um relevante Messgrößen zu erfassen, welche anschließend vom BMS verarbeitet werden. Die Energieversorgung der Überwachungseinheiten erfolgt über Niedervolt (NV) Leitungen. [52]

Die Batterie erreicht einen Gesamtenergieinhalt von ca. 8,8 kWh und die Spannung beträgt in Abhängigkeit vom Ladezustand zwischen 250V und 400V. Das Thermomanagementsystem arbeitet mit einer Wasser-Glykol Flüssigkeitskühlung und regelt den Kühlungsbedarf der Module durch Kommunikation mit dem Batteriemanagementsystem, welches die Temperaturverteilung innerhalb der Batterie durchgehend registriert. Plug-In-Hybridfahrzeuge stellen sehr hohe Anforderungen an das Thermomanagement, da alle Komponenten des Antriebsstranges unterschiedliche zulässige Kühlmitteltemperaturen besitzen. Bei diesem Kühlsystem kommt ein eigener Niedertemperaturkreislauf für temperaturempfindliche Komponenten wie das Ladegerät, die Leistungselektronik und die Hochvolt-Batterie zum Einsatz. Ein zweiter Niedertemperaturkreislauf ist für die Ladeluftkühlung sowie zur Kühlung der elektrischen Maschine erforderlich. Der konventionelle Motorkühlkreislauf für die Verbrennungskraftmaschine und den Getriebeölkühler ist ebenso noch vorhanden. [52]

Die Überdrucköffnung an der Oberseite des Batteriesystems ist als Membranventil ausgeführt und hat grundsätzlich zwei Funktionen. Zum einen sorgt diese für den Ausgleich von Druckschwankungen innerhalb des Systems und ermöglicht so die Atmung durch das Ventil im geschlossenen Zustand. Zum anderen öffnet sich das Membranventil, um schädliche Gase freizusetzen und bewirkt so eine druckgesteuerte Notentriegelung. [52]

2.2 Elektrische Maschinen

Abbildung 2-17 zeigt den prinzipiellen äußeren Aufbau einer elektrischen Maschine. Grundsätzlich besteht eine Elektromaschine aus einem feststehenden- und einem rotierenden Bauteil. Der feste Teil wird als Stator oder Ständer bezeichnet, in welchem die elektrische Leistung zu- oder abgeführt wird. Der rotierende Teil wird als Rotor oder Läufer bezeichnet und in diesem wird die mechanische Leistung zu- oder abgeführt. [7] [32]

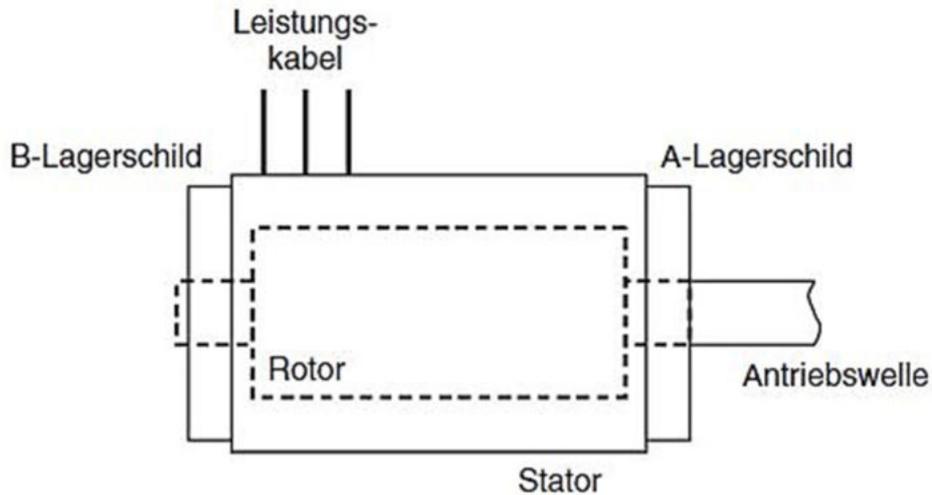


Abbildung 2-17: Prinzipieller äußerer Aufbau einer elektrischen Maschine [32]

Diese Konfiguration wird als Innenläufermotor bezeichnet. Es existieren aber auch Außenläufermotoren, wo der drehende Rotor außen und der feststehende Stator innen angeordnet sind. Eine solche Konfiguration kommt beispielsweise bei Radnabenmotoren oder in manchen Hybridantrieben zum Einsatz. Für die Steuerung und Regelung der heute in Antriebssystemen eingesetzten elektrischen Maschinen wird eine Leistungselektronik benötigt, welche die Maschine über die Leistungskabeln mit Energie versorgt. Den Aufbau sowie die Funktionsweise der Leistungselektronik werden im nächsten Kapitel „6.2.3 Leistungselektronik“ näher erläutert. [7] [32]

Dadurch, dass sowohl im Rotor als auch im Stator Verlustleistungen (Eisen- und ohmsche Verluste) auftreten, sind kompakte elektrische Traktionsmaschinen meist mit einer Flüssigkeitskühlung ausgeführt. Der Kühlmantel und die einzelnen Kühlkanäle zur Wärmeabfuhr sind der Einfachheit halber nicht in Abbildung 2-17 enthalten.

Das auf die Antriebswelle wirkende Drehmoment muss entsprechend am Maschinengehäuse abgestützt werden. Dazu wird die Rotorwelle in den Lagerschildern gelagert. Die Lagerschilder werden typischerweise durch Schraubverbindungen an das Gehäuse angebunden. Während die elektrischen Maschinen bei vollelektrischen Fahrzeugen in der Regel als elektrische Achsantriebseinheit ausgeführt werden, sind die Elektromaschinen bei Hybridfahrzeugen oft in die Antriebsstränge teil- oder vollintegriert. Daher sind diese elektrischen Maschinen in Hybridantrieben oft ohne eigene Lagerung ausgeführt. Häufig, insbesondere bei Lösungen, die in den Antriebsstrang integriert sind, werden auch andere Baugruppen wie Kupplungen oder Getriebekomponenten mit den elektrischen Maschinen kombiniert. Insbesondere die Ausführung mit Außenläufer ermöglicht die kompakte Anbindung an Trockenkupplungen, Schwungradscheiben oder Elementen des Zweimassenschwungrads. Die Integration von elektrischen Maschinen in den hybriden Antriebsstrang wird im Kapitel „6.2.4 Getriebe“ näher erläutert. [7] [32]

Elektrische Maschinen haben sich aufgrund ihrer robusten Bauweise und sehr gutem Wirkungsgrad bewährt. Die grundsätzliche Unterteilung der wichtigsten Maschinenarten ist in Abbildung 2-18 ersichtlich. Als Fahrzeugantrieb werden derzeit Wechselstrommaschinen hauptsächlich in Form von permanent erregten Synchronmaschinen (PSM) sowie Asynchronmaschinen (ASM) eingesetzt. Aber auch Sonderbauformen der Synchronmaschine mit Fremderregung oder Nutzung des Reluktanz-Effektes finden Anwendung im automotiven Bereich. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden nur die PSM und die ASM hinsichtlich ihrer Funktionsweise, Betriebsverhalten sowie Aufbau genauer betrachtet. [14]

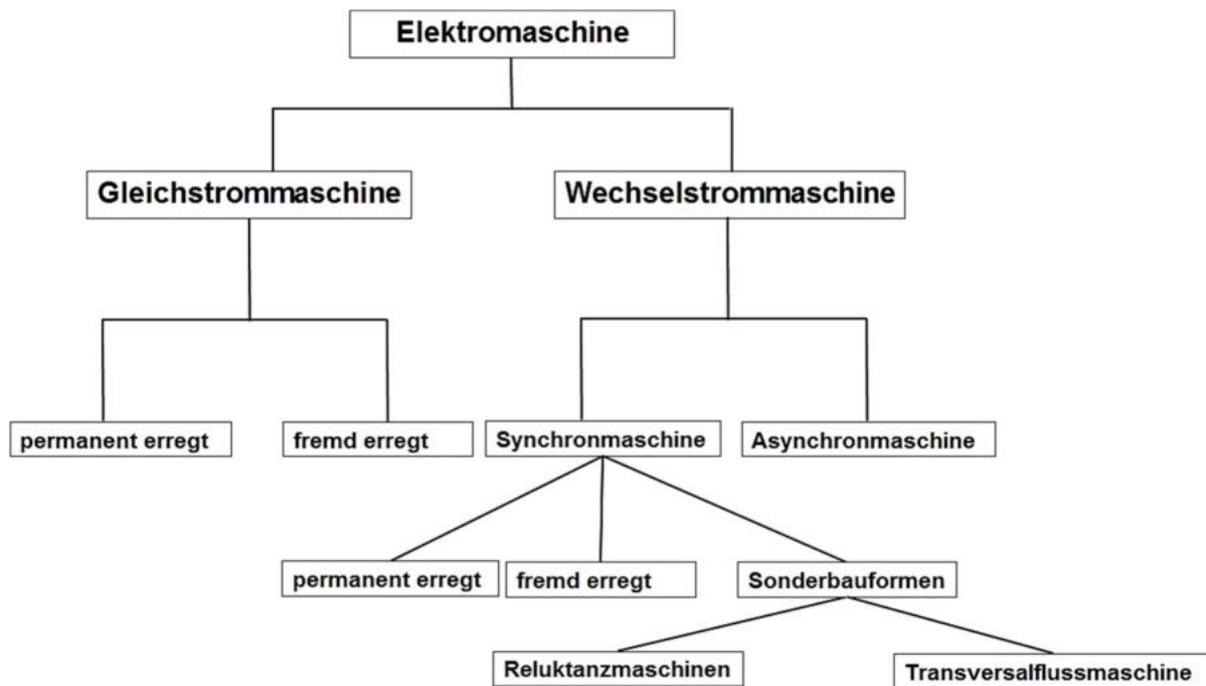


Abbildung 2-18: Unterteilung von Elektromaschinen nach Maschinenart [14]

Betriebsgrenzen einer elektrischen Maschine

Die Besonderheit elektrischer Maschinen besteht darin, dass es zwei verschiedene Betriebsgrenzen (Dauer- und Überlastbereich) gibt, innerhalb derer sie betrieben werden können. Innerhalb der Nenngrößen (Nenn Drehmoment und -drehzahl) können die Maschinen dauerhaft betrieben werden, ohne eine thermische- oder mechanische Überlastung hervorzurufen. Darüber hinaus gibt es den Überlastbereich, in dem die Maschine kurzzeitig mit teilweise deutlich höheren Drehmoment- und Leistungswerten betrieben werden können. Im Überlastbereich können diese Maximalgrößen allerdings nur für sehr kurze Zeit gefahren werden, um keine thermische Überlastung der Maschine zu verursachen. Als Angabe von Maximalleistungen und Momenten haben sich 30 Sekunden Peaklasten (Maximallasten) etabliert. Die Dauer und Höhe der zulässigen Überlast wird hauptsächlich durch die Wicklungstemperatur sowie der mechanischen Festigkeit und der Rotorlager begrenzt. Als Überlastungsschutz der elektrischen Maschine werden meist die inneren Wicklungskopf- und Kühlmitteltemperaturen erfasst und zur Auswertung an die Leistungselektronik übertragen. Bei zu hoher Belastung wird die Leistung abgeregelt. [7]

Typische PSM-Betriebsverhalten in vereinfachter Darstellung

Elektromaschinen können bereits im Stillstand Drehmoment abgeben. Daher ist es möglich, dass bei einem Antriebssystem mit elektrischer Maschine die Anfahrkupplung weggelassen werden kann. In Abbildung 2-19 ist ein schematisches Kennfeld für eine typische Permanent erregte Synchronmaschine

dargestellt. Im Feldschwächebereich bleibt die Leistung näherungsweise konstant und das Drehmoment nimmt umgekehrt proportional zur Drehzahl ab. Für Asynchronmaschinen ist das Kennfeld ähnlich, allerdings nimmt im Feldschwächungsbereich die Leistung mit steigender Drehzahl ab und das Drehmoment sinkt ungefähr umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Drehzahl. [7]

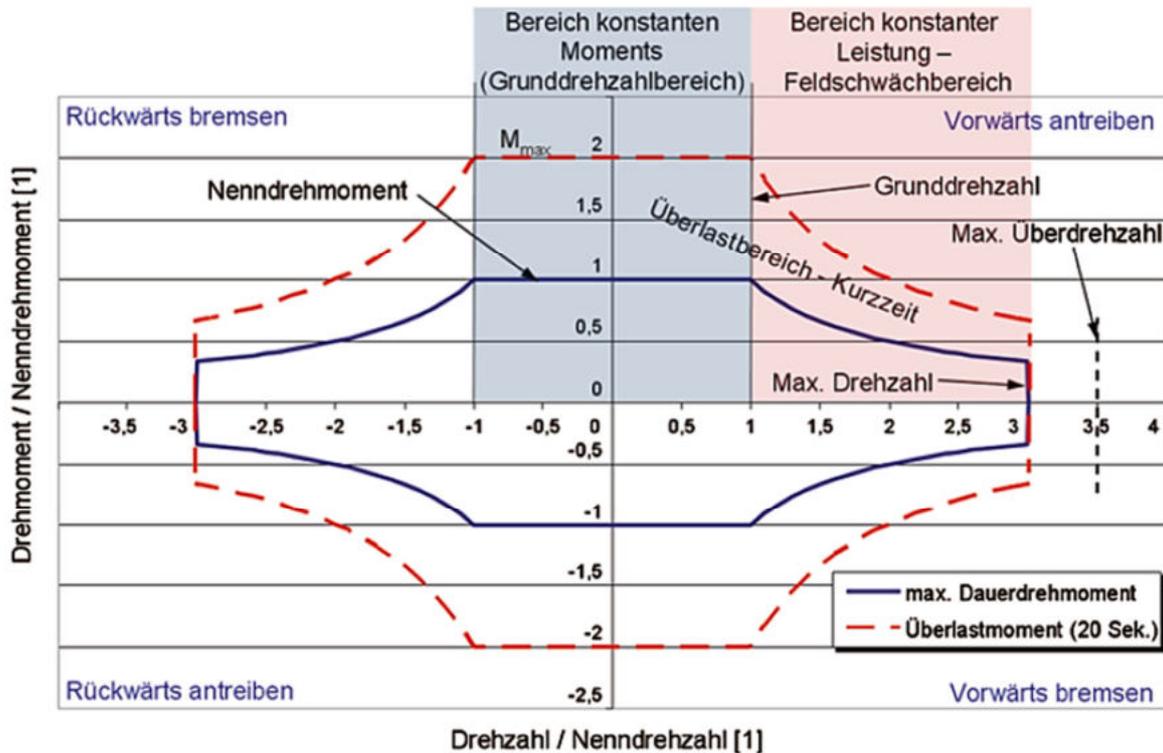


Abbildung 2-19: Allgemeine Betriebskennlinien für elektrische Maschinen [7]

Wenn die Ansteuerung es zulässt, kann die E-Maschine grundsätzlich in beiden Drehrichtungen sowohl zum Antreiben als auch zum Bremsen verwendet werden. Das bedeutet die elektrische Maschine kann in allen Vier-Quadranten arbeiten. Der Grunddrehzahlbereich charakterisiert den Bereich, wo das Nennmoment beziehungsweise das Maximaldrehmoment eingestellt werden kann. Wird in diesem Bereich die Drehzahl bei konstantem Drehmoment erhöht, steigt die mechanische Leistung linear an, bis die Nennleistung erreicht ist. Dabei ist der Strom proportional zum Drehmoment und die Spannung proportional zur Drehzahl. Wenn an der Nennzahl die maximale Spannung erreicht ist, wird in der Stator-Wicklung eine Gegenspannung induziert, welche einen induktiven Widerstand darstellt. Um in diesem Bereich bei gleichbleibender Spannung eine Drehzahlsteigerung zu erreichen, wird der magnetische Fluss durch Senken des Stroms in den Kupferwicklungen des Stators reduziert. Dieser Bereich wird als Feldschwächbereich bezeichnet und bewirkt demnach eine Drehmomentabsenkung. [7]

Typisches ASM-Betriebsverhalten in vereinfachter Darstellung

In Abbildung 2-20 ist in Abhängigkeit der Drehzahl die typische Drehmomentcharakteristik einer Asynchronmaschine dargestellt. Anhand der idealisierten Kennlinie ist zu erkennen, dass wie bei der PSM das konstante maximale Drehmoment bereits aus dem Stillstand bis zur Nennzahl n_{nom} abgerufen werden kann. Die Motorleistung P_M steigt bis zu dieser Drehzahl linear an, da sie proportional zum Produkt aus Drehmoment und Drehzahl ist. Dieser Bereich kennzeichnet den sogenannten Grunddrehzahlbereich. Ab dieser Drehzahl weist eine Asynchronmaschine im Vergleich

zur PSM eine andere Charakteristik in Bezug auf die maximal erreichbare Leistung und Drehmoment auf. Im Feldschwächungsbereich ist ein Leistungsabfall mit zunehmender Drehzahl zu erkennen. Da das Drehmoment umgekehrt proportional zur Leistung ist, ergibt sich bei der ASM ein deutlich höherer Drehmomentverlust als bei der PSM. [14] [32]

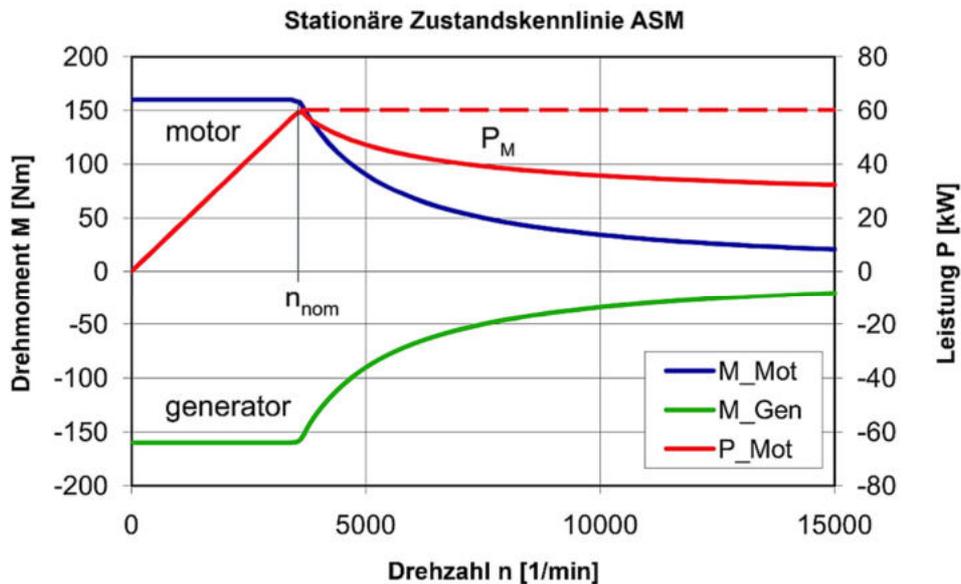


Abbildung 2-20: Idealisierte stationäre Zustandskennlinie einer Asynchronmaschine [14]

Magnetische Drehfelderzeugung

Eine Drehstrommaschine ist eine Wechselstrommaschine. Aufbau und Funktionsweise der Maschine beruhen auf einem magnetischen Drehfeld, welches zur Drehmomenterzeugung notwendig ist. Das magnetische Feld wird dabei mittels Drehstromwicklungen durch einen dreiphasigen Wechselstrom erzeugt. Das bedeutet, dass entweder der Stator oder Rotor mit einer Erregerwicklung ausgestattet sein muss, um ein magnetisches Feld erzeugen zu können. In den meisten Fällen ist der Stator mit dieser Wicklung ausgestattet, die meist aus Kupferdrähten besteht. Im Allgemeinen bestehen die Wicklungen aus rotationssymmetrisch verteilten Strängen. In der Regel werden für die praktische Anwendung die Drehstromwicklungen zu insgesamt drei Strängen zusammengeschaltet. Die drei Wechselspannungen des Wechselstromnetzes sind dabei zeitlich um 120° phasenverschoben und speisen die drei Wicklungen mit Strömen, sodass ein magnetisches Drehfeld entsteht. [7] [32]

Grundlagen der Elektromechanischen-Energiewandlung

Zwei physikalische Beziehungen werden nun genutzt, um dieses magnetische Drehfeld zur Erzeugung von Drehmoment bzw. Drehzahl zu verwenden. Wenn ein Strom durch einen elektrischen Leiter in einem Magnetfeld fließt, wirkt eine Kraft auf ihn (motorischer Betrieb). Dieser Effekt ist auf die sogenannte Lorentzkraft zurückzuführen. Wird das von einem elektrischen Leiter umschlossene Magnetfeld hingegen verändert, zum Beispiel durch mechanischem Antrieb, so wird am Leiter eine Spannung induziert (Induktionsgesetz), generatorischer Betrieb. Diese beiden Merkmale sind typisch für elektrische Maschinen. Werden die einzelnen Leiter von einem Strom durchflossen, erzeugen sie ein Drehmoment (Motorbetrieb). Erfolgt eine Veränderung des magnetischen Feldes durch mechanischen Antrieb, so wird eine Spannung und in weiterer Folge ein Stromfluss erzeugt (Generatorbetrieb). [57]

Prinzipieller innerer Aufbau PSM im Vergleich zu ASM

Abbildung 2-21 zeigt eine Gegenüberstellung vom prinzipiellen inneren Aufbau einer permanent erregten Synchronmaschine und einer Asynchronmaschine. Der Ständer mit den eingebetteten Wicklungen ist bei den beiden Maschinentypen gleich ausgeführt. Die einzigen Unterschiede bestehen in der Ausführung des Rotors. Die Synchronmaschine besitzt eine permanentmagnetische Erregung im Rotor. Der Rotor folgt dem magnetischen Drehfeld des Stators mit synchroner Drehzahl. Die Asynchronmaschine besitzt einen Rotor, der mit einem Kurzschlusskäfig (keine Magnete) ausgeführt ist. Bei diesem Maschinentyp folgt der Rotor dem magnetischen Drehfeld des Stators mit einer Abweichung, welche als Schlupf bezeichnet wird. Solange die Rotordrehzahl vom magnetischen Stator-Drehfeld abweicht, induziert das Stator-Drehfeld Ströme in den Kurzschlusskäfig des Rotors, sodass ein Drehmoment resultiert. Im inneren des Läufers ist die Rotorwelle integriert, die den Rotor trägt und das generierte Drehmoment mechanisch weiterleitet. [7] [32]

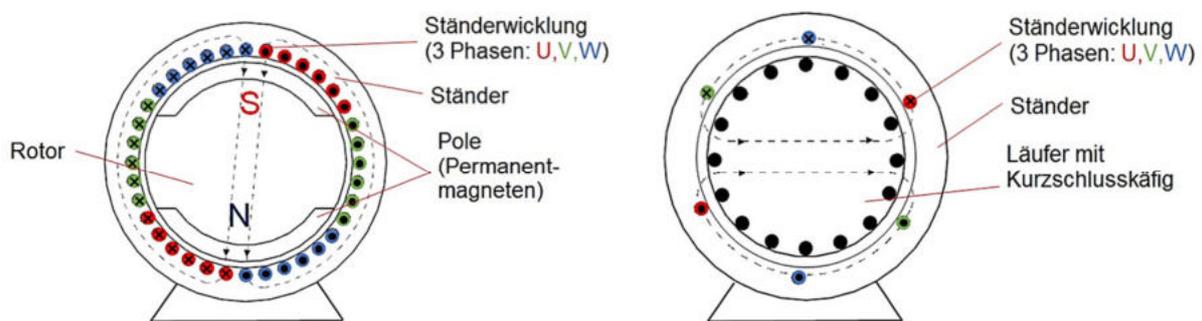


Abbildung 2-21: Prinzipieller innerer Aufbau einer PSM mit Innenläufer und ASM mit Kurzschlussläufer [14]

Bei beiden Maschinentypen ist sowohl der Rotor als auch der Stator aus dünnen Einzelblechen geschichtet aufgebaut, um ein starkes Magnetfeld zu erzeugen. Auf diesen Blechen ist eine elektrisch isolierende Schicht aufgetragen, sodass die Verluste, die durch die veränderlichen Magnetfelder entstehen, möglichst gering sind. Die einzelnen Bleche werden zu einem sogenannten Blechpaket zusammengefügt, das für die geschlossene Leitung des magnetischen Flusses verantwortlich ist. Als Material für die Blechpakete kommen in der Regel Eisenbleche mit geringem Siliziumanteil zum Einsatz. Es wird daher auch als aktive Komponente bezeichnet. Die Elektrobleche müssen sowohl gute magnetische Materialeigenschaften aufweisen als auch eine möglichst verlustfreie Ummagnetisierung gewährleisten. Der sich ständig ändernde Fluss in der elektrischen Maschine und die damit verbundene zeitlich veränderliche Magnetisierung verursachen die sogenannten Eisenverluste. Diese Verluste können weiter in Hysterese- und Wirbelstromverluste unterteilt werden und erwärmen das Blechpaket. [7] [32]

Beim Bau von elektrischen Maschinen sind Wicklungs-Materialien wichtig, die eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Als elektrische Leiterwerkstoffe werden aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit hauptsächlich Stator-Wicklungen aus Kupfer eingesetzt. Aber auch Kupfer hat einen geringen Widerstand. Durch diesen entstehen ohmsche Verluste und die Erwärmung der Kupferwicklungen. Für die Einbettung der Stator-Wicklungen sind Nuten in das Stator-Blechpaket eingearbeitet. Darüber hinaus sind Isolationsmaterialien notwendig, um die stromführenden Kupferwicklungen von nicht stromführenden Teilen, wie das Stator-Blechpaket elektrisch zu trennen. Die wesentliche Beschränkung der maximal zulässigen Temperatur einer elektrischen Maschine wird durch die thermischen Eigenschaften der verwendeten Isolierstoffe und die Maximaltemperaturen der Rotorlager bestimmt. [7] [32]

Vergleich der verschiedenen elektrischen Maschinen

Beim Vergleich der verschiedenen elektrischen Maschinen muss stets die dazugehörige Leistungselektronik in Betracht gezogen werden. Der höchstmögliche Wirkungsgrad der Leistungselektronik beträgt in der Regel 93-99%. Den größten Einfluss auf den maximalen Wirkungsgrad des Antriebssystems haben allerdings immer noch die elektrischen Maschinen. Die verschiedenen Maschinentypen erreichen die maximalen Wirkungsgrade in unterschiedlichen Drehzahl- und Drehmomentbereichen. In nachfolgender Tabelle 2-8 sind die wichtigsten technischen Daten von Standardausführungen verschiedener elektrischer Maschinen als Vergleich ersichtlich. Bei automotiven Traktionsmaschinen werden inzwischen um bis zu 3% höhere Wirkungsgrade und um mehrfache Faktoren höhere spezifische Leistungen und Drehmomente erzielt. [7] [58]

Tabelle 2-9 zeigt eine Vergleichsmatrix von ausgewählten elektrischen Maschinen zur qualitativen Bewertung einzelner Kriterien.

	Gleichstrommaschine	Permanenterregte Synchronmaschine	Asynchronmaschine
Höchstdrehzahl (1/min)	7.000	> 10.000	> 10.000
Spezifisches Dauerdrehmoment (Nm/kg)	0,7	0,95 - 1,72	0,6 – 0,8
Spezifische Dauerleistung (kW/kg)	0,15 – 0,25	0,3 – 0,95	0,2 – 0,55
Maximaler Wirkungsgrad Maschine	0,82 – 0,88	0,89 – 0,95	0,87 – 0,92
Maximaler Wirkungsgrad Leistungselektronik	0,98 – 0,99	0,93 – 0,98	0,93 – 0,98
Maximaler Wirkungsgrad Antriebseinheit (ohne Getriebe)	0,8 – 0,85	0,83 – 0,93	0,81 – 0,90

Tabelle 2-8: Leistungsmerkmale von ausgewählten elektrischen Maschinen [7] [58] [59]

Mit permanent erregten Maschinen lassen sich sehr hohe Wirkungsgrade erzielen. Allerdings sind die dort bisher verwendeten Dauermagnete kostenintensiv und daher ist die PSM teurer im Vergleich zur ASM. Durch den Einsatz von Permanentmagneten zum Aufbau des Erregerfeldes erreicht diese Antriebsvariante vor allem im Teillastbereich die höchsten Wirkungsgrade. Die Asynchronmaschine hingegen erzielt ihre besten Wirkungsgrade bei höheren Drehzahlen. Die ASM wird in der Regel bei hochtourigen Anwendungen in Kombination mit einem Reduziergetriebe eingesetzt. [7] [60]

	Gleichstrommaschine	Permanenterregte Synchronmaschine	Asynchronmaschine
Leistungsdichte	-	++	+
Drehmomentdichte	-	++	+/-
Wirkungsgrad	-	++	+/-
Gewicht Maschine	-	++	+
Regelung	++	+	+/-
Geräuschentwicklung	+	++	+
Thermische Überlastfähigkeit	-	+/-	++
Kosten Maschine	-	-	+
Kosten System	+/-	+/-	++
Fertigungsaufwand	-	-	+
Robustheit	+/-	+	++
Sicherheitsverhalten	-	-	++

++	+	+/-	-	--
sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht

Tabelle 2-9: Bewertungsmatrix von ausgewählten elektrischen Maschinen [7] [61]

Funktionale Sicherheit von elektrischen Maschinen

Ein entscheidender Aspekt bei der Entwicklung von elektrischen Antriebssystemen ist die funktionale Sicherheit. Um Unfälle durch ungewollte Beschleunigungs- oder Bremsmomente zu vermeiden, dürfen im Störfall keine oder nur sehr geringe Drehmomentwerte erzeugt werden. Die verschiedenen elektrischen Maschinen verhalten sich systembedingt unterschiedlich in Bezug auf Fehler oder Notabschaltungen. [7]

Die Asynchronmaschine profitiert im Gegensatz zur permanenterregten Synchronmaschine von ihrer Bauart, da bei einer rotierenden Maschine nach dem Abschalten kein permanenter Kurzschlussstrom fließen kann, weil das Magnetfeld bei der ASM nicht permanent ist (keine Magnete). Dadurch kann die ASM bei von außen eingebrachten Bewegungen, wie zum Beispiel beim Abschleppen oder im Falle einer mitdrehenden Achse bei Allradantrieben, widerstandslos mitlaufen, sobald die Stromzufuhr in die Statorwicklungen eingestellt wird. Permanenterregte Synchronmaschinen arbeiten im Falle eines Abschleppens, bei dem die Antriebsachse einer Drehbewegung ausgesetzt wird, zwangsweise als Generator. Bei inaktivem HV-System werden daher unerwünschte Spannungen in das eigentlich stromlose HV-Bordnetz induziert, wodurch es zur Beschädigung der Leistungselektronik kommen kann. Im Falle des Abschleppens ist jedoch unbedingt die Betriebsanleitung des jeweiligen Fahrzeugherstellers zu beachten. [7]

Im Fahrbetrieb entstehen bei der PSM bei einem möglichen Kurzschluss in den Wicklungen oder bei einer Störung des Antriebsumrichter Momente, welche zu nicht beherrschbaren Fahrzuständen führen

können. Die im Störfall unzulässig hohen Spannungswerte müsse daher unbedingt vermieden werden. Dies beeinflusst die Auslegung einer PSM. Für fremderregte Maschinen hingegen kann das elektrische Feld von außen abgeschaltet werden. Um die notwendige Sicherheit im Antriebssystem zu realisieren, sind mehrere Software-, Hardware- und Systemmaßnahmen erforderlich. Vor allem die redundante Verarbeitung aller sicherheitsrelevanten Daten wie Drehmoment und Rotordrehzahl ist neben der Überwachungsfunktion notwendig. Um das Mikrocontrollersystem zu überwachen, werden Speicher und Umgebungsgeräte während der Laufzeit überprüft. Mögliche Abweichungen zwischen Software sowie der Hardware des Controllers müssen umgehend zu einem Abschalten des Systems führen. [7]

2.2.1 Ausgeführte Beispiele von elektrischen Maschinen

Die folgenden Unterkapitel beschreiben eine PSM und ASM anhand von zwei beispielhaften Ausführungen. Details der Ausführungen können bei anderen Maschinen des gleichen Typs (PSM, ASM) abweichen.

2.2.1.1 Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)

Der Name Synchronmaschine beruht auf der Eigenschaft, dass der Rotor mit der exakt gleichen Drehzahl (synchron) wie das Drehfeld des Stators rotiert. Nur so kann diese Art von Maschine ein nutzbares Drehmoment abgeben. [32]

Permanenterregte Synchronmaschinen sind die gebräuchlichsten elektrischen Maschinen, die heute in Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, da diese im Vergleich zur ASM eine höhere Drehmoment- und Leistungsdichte sowie einen erhöhten Wirkungsgrad aufweisen. Nachteilig einzustufen sind bei dieser Bauart die Maschinenkosten, der Fertigungsaufwand sowie das Sicherheitsverhalten und die Abhängigkeit von bestimmten Rohstoffen (seltene Erden) für die Permanentmagnete. Im Allgemeinen sind PSM dreiphasige Synchronmaschinen, die mit Wechselstrom betrieben werden und eine ähnliche Bauweise wie bürstenlose Gleichstrommaschinen aufweisen. [14]

Mechanisch-Elektrischer Aufbau einer ausgeführten PSM

Der in den Dreiphasen-Kupferwicklungen des Stators fließende Strom erzeugt einen rotierenden magnetischen Fluss (Drehfeld). Das Magnetfeld im Rotor wird von den Permanentmagneten aufgebaut und durchdringt den Stator. Dies bewirkt eine Kraft in Umfangsrichtung bei gleicher Drehzahl von Rotor und Drehfeld des Stators.

Der Stator der beispielhaften permanenterregten Synchronmaschine umfasst das Blechpaket und die dreiphasige Wicklung (U, V, W) aus Kupfer-Profildraht, siehe Abbildung 2-22. Die verwendete Wickeltechnik basiert bei dieser Ausführung auf der Hairpin-Technologie. Diese beruht auf Steckspulen, die in die Nuten des Stator-Blechpakets eingesetzt werden. Die Steckspulen, die sogenannten Hairpins, werden aus U-förmig gebogenen lackisolierten Kupferflachdrähten hergestellt. Durch das komplexe Herstellungsverfahren können die rechteckigen Flachdrähte jedoch dichter gepackt und somit mehr Kupfer in die Nuten integriert werden als bei einer herkömmlichen Spulenwickeltechnik. Dies erhöht nicht nur die Leistung und das Drehmoment bei gleichem Volumen des Motors, sondern auch die Wärmeabfuhr des Stators, da sich im Vergleich zu Runddrähten weniger Lufthohlräume (Luft ist schlechter Wärmeleiter) in den Stator-Nuten befinden. [11]

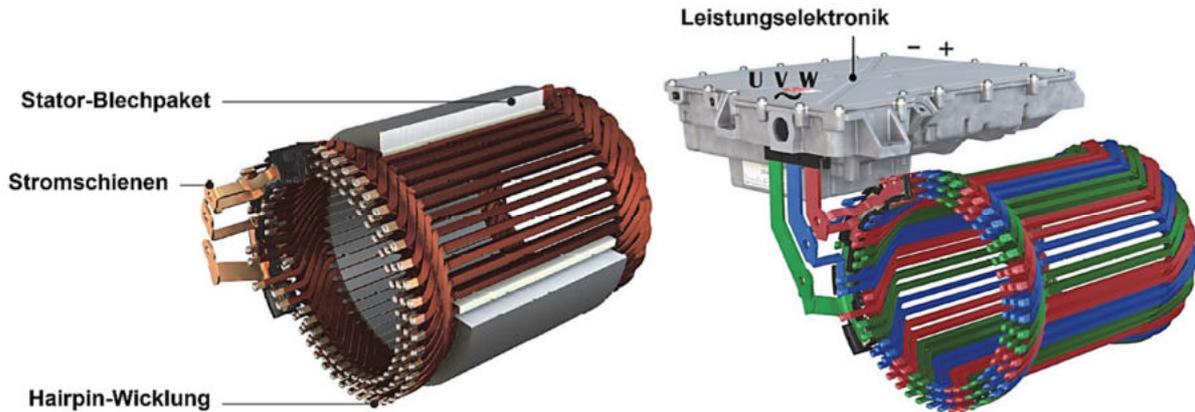


Abbildung 2-22: Aufbau des Stators der PSM (links) und Phasenordnung im Stator (rechts) [11]

Das Stator-Blechpaket setzt sich aus einzelnen geschichteten Eisenblechen zusammen. Das Blech ist auf beiden Seiten mit einer elektrisch isolierenden Beschichtung versiegelt. Die Bleche können mittels verschiedener Fügeverfahren, wie z.B. Stanzpaketieren, Laserschweißen oder Verklebung zusammengefügt werden. Das gesamte Stator-Blechpaket besteht bei diesem Beispiel aus vier Teilpaketen, die bei der Montage jeweils um 90 Grad versetzt angeordnet werden. Dies reduziert den Einfluss der Walzrichtung des Blechmaterial auf die Homogenität des magnetischen Drehfelds. Nach dem Einsetzen der Steckspulen mit isolierenden U-förmigen Trennelementen in die Stator-Nuten des Stators werden die Spulen zu den drei Phasen auf einer Seite verschweißt und anschließend die Stromschienen kontaktiert, siehe Abbildung 2-22 (rechts). Mittels Schrupfverfahren wird der fertige Stator mit dem Maschinengehäuse gefügt. [11]

Der Rotor einer permanenterrregten Synchronmaschine umfasst im Allgemeinen die Rotorwelle, das Rotor-Blechpaket mit den eingebetteten Permanentmagneten, den Wuchtscheiben sowie den Resolver, siehe Abbildung 2-23.

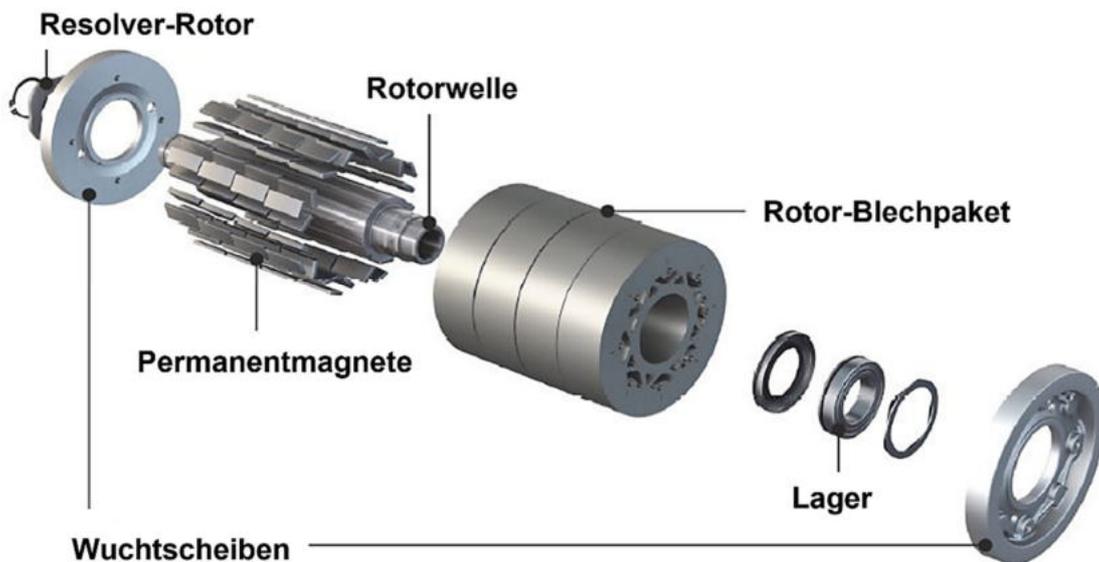


Abbildung 2-23: Aufbau vom Rotor der PSM [11]

Als Resolver wird ein elektromagnetischer Messumformer bezeichnet, der die Winkellage des Rotors in eine elektrische Größe umwandelt (Winkel- und Drehzahlsensor). Das Rotorblechpaket ist mit

Magneten aus hochwertigen Dauermagnetmaterialien wie Neodym und Dysprosium bestückt. Die Magnete können dabei entweder auf die Rotoroberfläche geklebt, umwickelt oder in das Rotorblechpaket eingegraben werden. Eingraben bedeutet das Einstecken prismatischer Magnetstäbe in meist V-förmig angeordnete Längsschlitze im Rotor-Blechpaket. Die ausgeführte Bauweise mit vergrabenen Magneten weist eine hohe Drehmomentdichte auf und bietet Vorteile in Bezug auf Effizienz und Leistungsdichte. Neben den genannten Vorteilen weist diese Ausführung außerdem eine höhere Robustheit auf, sodass in den heutigen Entwicklungen nahezu ausschließlich diese Art der Magnetbefestigung bei PSM umgesetzt wird. Um Unwuchten auszugleichen, werden die Stirnseiten des Rotors mit Wuchtscheiben aus Aluminium oder Edelstahl versehen und über das Rotorblechpaket mit Spannschrauben zueinander verschraubt. Die Rotorwelle ist bei diesem Ausführungsbeispiel als Hohlwelle realisiert und wird durch Verschweißen aus zwei Teilen zusammengefügt. [11] [62]

Die Leistungselektronik muss für die Ansteuerung der permanenten Synchronmaschine die Drehwinkelstellung des Rotors kennen, sodass die Drehstromwicklung im Stator gezielt bestromt werden kann. Der Drehwinkelsensor ist häufig in der Bauweise eines Resolvers ausgeführt. Der Resolver besteht aus einem rotierenden ringförmigen Bauteil auf der Rotorwelle und einem stehenden Bauteil mit einer elektrischen Spule, welches meist am B-Lagerschild (freies Motorende) befestigt ist. Abbildung 2-24 zeigt diese Komponenten im eingebauten Zustand. [11]

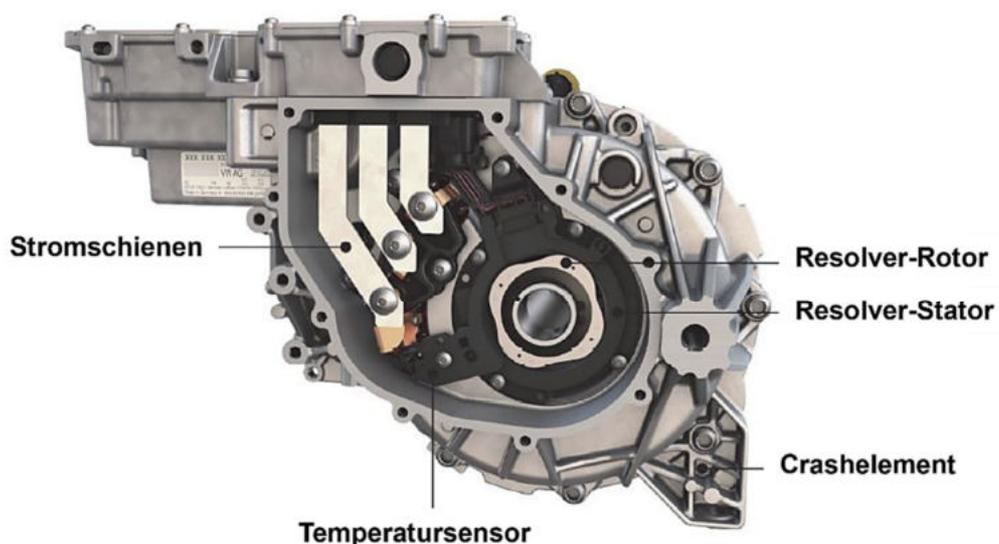


Abbildung 2-24: Komponenten am B-Lagerschild der PSM [11]

Zur Erfassung der Temperatur der Dreiphasenwicklung wird ein Temperatursensor verwendet, der an einem dafür ausgeformten Messpunkt der Hairpin-Wicklung integriert ist. Die Messsignale vom Resolver und Temperatursensor werden über einen Signalstecker zur Leistungselektronik geführt und dort verarbeitet. Über Schraubverbindungen erfolgt bei diesem Beispiel die direkte Anbindung der Leistungselektronik an das Gehäuse der elektrischen Maschine. Nach der Montage der Steuereinheit am Motorgehäuse werden die drei Stromschienen an die Kontaktbrücke der Phasenwicklung des Stators geschraubt. [11]

Die in den Kupferwicklungen anfallende Wärme wird über den flüssigkeitsgekühlten Kühlmantel des Maschinengehäuses abgeführt. Im Kapitel „6.3.2 Thermomanagement“ werden ausgeführte Kühlkonzepte von elektrischen Maschinen näher erörtert.

Wirkungsgradkennfeld der ausgeführten PSM

Das Wirkungsgradkennfeld dieser ausgeführten permanenterregten Synchronmaschine ist in Abbildung 2-25 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass der beste Wirkungsgrad der Maschine einen sehr großen Bereich umfasst und im mittleren Drehzahlbereich von der unteren Teillast bis zur Volllast reicht. [11]

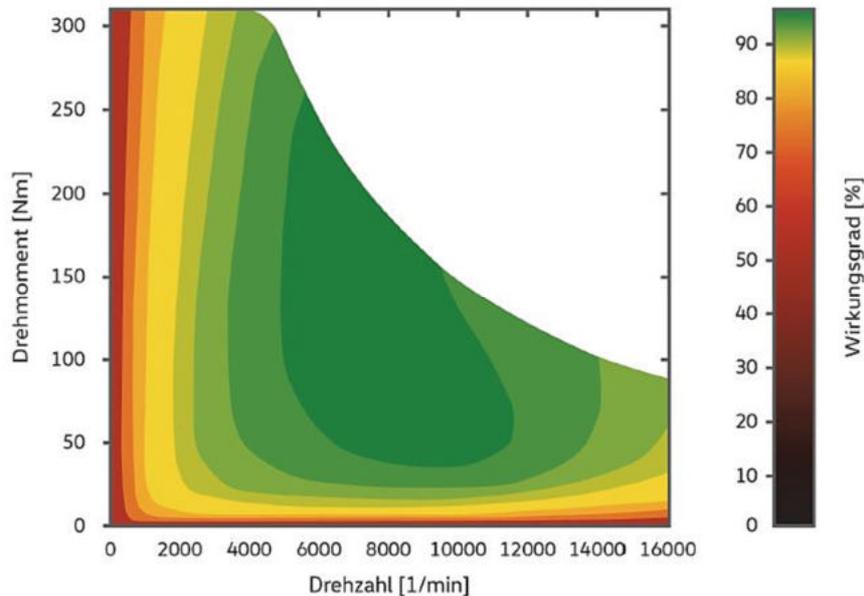


Abbildung 2-25: Wirkungsgradkennfeld einer permanenterregten Synchronmaschine [11]

2.2.1.2 Asynchronmaschine (ASM)

Der Name Asynchronmaschine beruht auf der Eigenschaft, dass das magnetische Drehfeld des Stators und die Rotordrehzahl unterschiedliche Geschwindigkeiten (asynchron) aufweisen. Diese Differenz wird als Schlupf bezeichnet und ist für die ASM ein notwendiges Kriterium zur Drehmomentabgabe. Durch diesen Schlupf werden Ströme im Kurzschlussläufer induziert, wodurch sich das Magnetfeld am Läufer erst aufbaut. Das dadurch resultierende Magnetfeld im Rotor bewirkt eine Umfangskraft (Lorenzkraft) im Kurzschlusskäfig, die als Drehmoment auf die Rotorwelle wirkt und letztlich den Rotor in Drehung versetzt. Zur Drehmomentabgabe drehen sich Rotor und Stator-Drehfeld somit asynchron zueinander. Aufgrund dieses Funktionsprinzips wird eine Asynchronmaschine auch als Induktionsmaschine bezeichnet. [14] [62]

Asynchronmaschinen bilden ebenso wie die PSM eine interessante Lösung als Antriebseinheit in Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeugen. Neben der einfachen und robusten Bauweise sind sowohl der Fertigungsaufwand als auch die Fertigungskosten im Vergleich zur PSM geringer. Außerdem besteht keine Abhängigkeit von den teuren und seltenen magnetischen Materialien. Andererseits wirken sich der etwas geringere Wirkungsgrad, die geringere Drehmoment- und Leistungsdichte sowie der größere Drehmomentabfall bei höheren Drehzahlen, nachteilig aus im Vergleich zur PSM. [14] [32]

Mechanisch-Elektrischer Aufbau einer ausgeführten ASM

Der Aufbau des Stators ist weitgehend vergleichbar mit dem der permanentenerregten Synchronmaschine. Die wesentlichen Unterschiede betreffen die Bauweise des Rotors.

Der Stator einer Asynchronmaschine umfasst bei dieser Ausführung das Blechpaket, und die dreiphasigen Runddraht-Wicklungen aus Kupfer, siehe Abbildung 2-26. Das Stator-Blechpaket kann im Allgemeinen mit dem Blechpaket des Ausführungsbeispiels der PSM gleichgesetzt werden. Für die Wicklung werden hier Kupfer-Runddrähte verwendet. Es wären aber auch alle anderen Wicklungstechnologien möglich. Die kompakten Wickelköpfe ermöglichen einen Bauraumvorteil und haben einen positiven Einfluss auf die volumetrische Leistungsdichte einer Asynchronmaschine. Die Nutisolationen sind in den Nuten des Blechpakets verbaut, um die Kupferwicklungen vom Blechpaket elektrisch zu trennen. Des Weiteren dienen diese Isolationen als Schutz für die Wicklungen an den Kanten der Stator-Nuten. Der Kühlmantel für die Flüssigkeitskühlung besteht aus dem Raum zwischen dem Stator- und Maschinengehäuse. Mittels Schrumpfverfahren wird der fertige Stator mit dem Maschinengehäuse gefügt. [63]

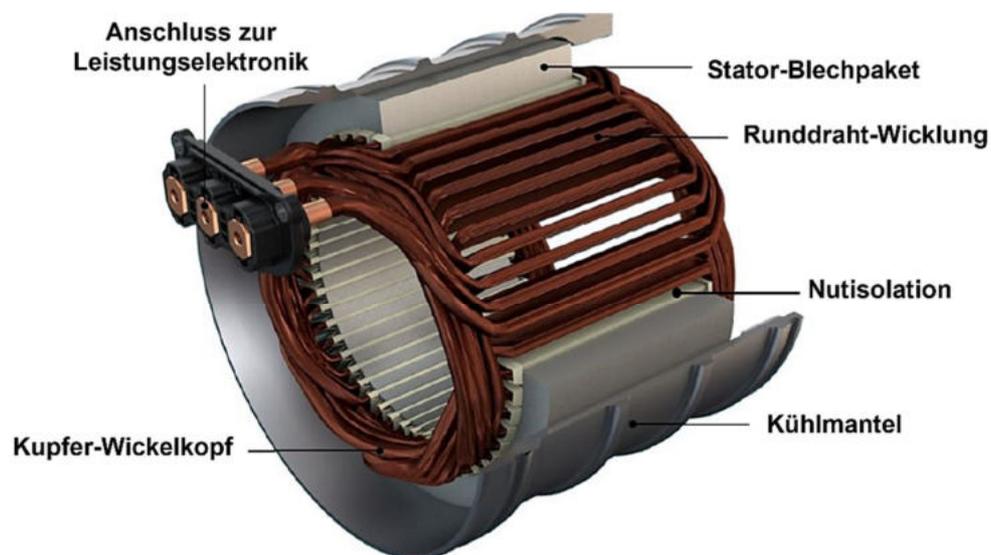


Abbildung 2-26: Aufbau des Stators einer Asynchronmaschine [63]

Der Rotor einer Asynchronmaschine umfasst im Allgemeinen die Rotorwelle, das Rotor-Blechpaket mit dem integrierten Aluminium-Kurzschlusskäfig, den Wuchtscheiben sowie den Resolver zur Erfassung der Rotordrehzahl für die Regelung, siehe Abbildung 2-27. Das Rotor-Blechpaket besteht dabei aus einzelnen Eisenblechen, die gleichmäßig zueinander versetzt sind, sodass sich für die Leiterstäbe des Käfigs ein gleichmäßiger Winkel über die Länge des Blechpakets ergibt. Dies führt zur Erzeugung eines gleichmäßigeren Drehmoments bei gleichzeitiger Verbesserung der akustischen Eigenschaften, ähnlich wie bei schrägverzahnten Stirnrädern. Um eine elektrische Verbindung der Leiterstäbe zu erreichen, werden Kurzschlusscheiben verwendet, die sich auf beiden Enden des Käfigs befinden. [63]

Die Rotorwelle ist bei diesem Beispiel als Hohlwelle mit schrägverzahnter Außenverzahnung ausgeführt. Diese außenliegende Verzahnung dient zum mechanischen Antrieb einer Ölpumpe, welche sich ebenfalls im Maschinengehäuse befindet. Bei dieser Maschine wird die Getriebeeingangswelle koaxial durch die Rotorwelle geführt und durch ein Schrumpfverfahren mit der Rotorwelle verbunden. [63]

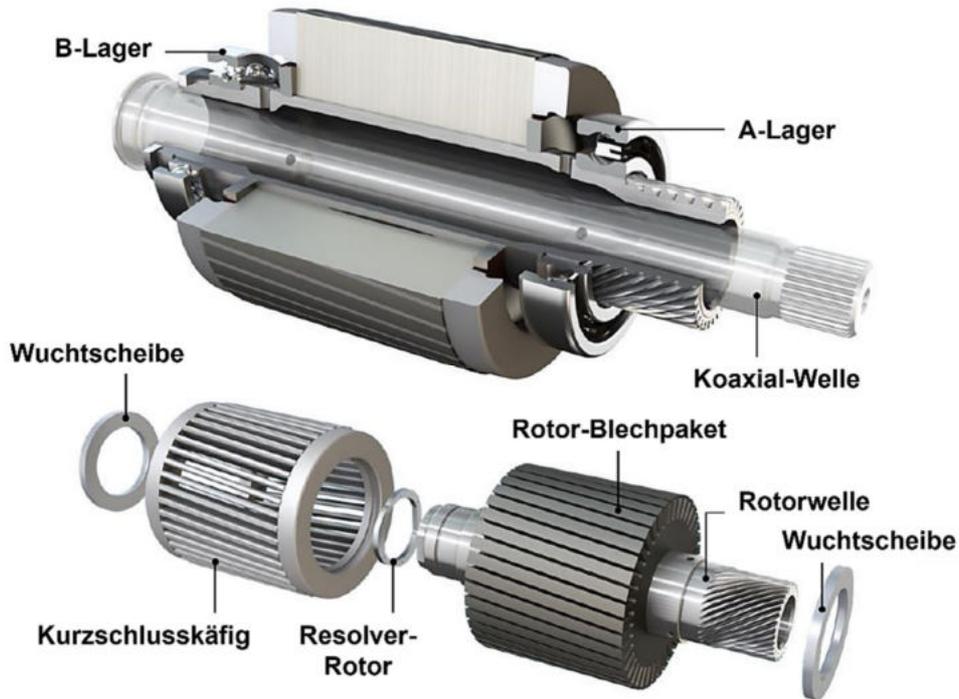


Abbildung 2-27: Montierter Rotor mit Koaxialwelle und Lager (oben) und Explosionsdarstellung der Rotorkomponenten (unten) einer ASM [63]

Wirkungsgradkennfeld der ausgeführten ASM

Das Wirkungsgradkennfeld dieser ausgeführten Asynchronmaschine ist in Abbildung 2-28 ersichtlich. Es ist gut erkennbar, dass der beste Wirkungsgrad der Maschine einen eher kleineren Bereich umfasst und tendenziell bei höheren Drehzahlen erzielt wird als bei der PSM. Im Vergleich zur PSM erreicht die ASM einen um etwa 3-4% geringeren maximalen Wirkungsgrad und auch schlechtere Wirkungsgrade im Teillastbereich. Allerdings kann eine ASM auch wirkungsgradvorteile im Hochdrehzahlbereich aufweisen. [63]

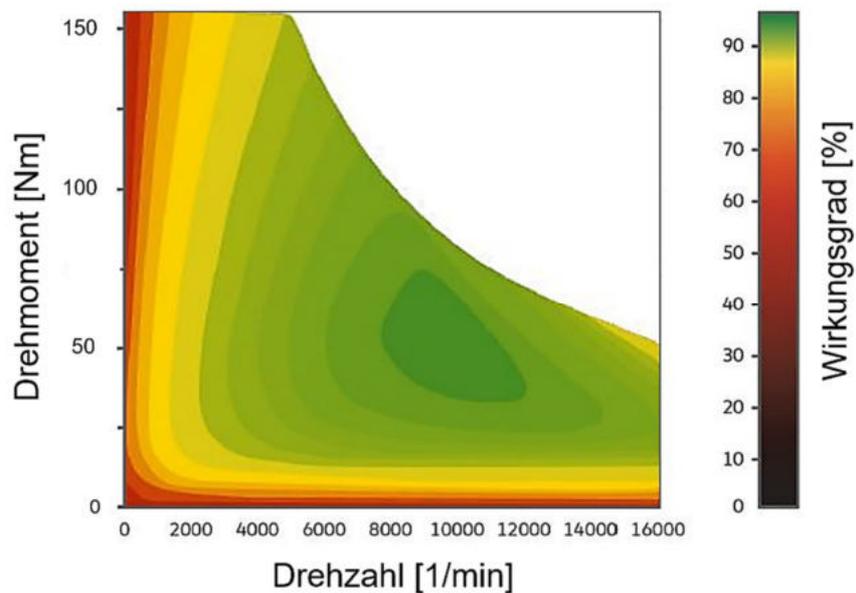


Abbildung 2-28: Wirkungsgradkennfeld einer Asynchronmaschine [63]

2.3 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik wird benötigt zum Betrieb der elektrischen Antriebsmaschinen, der Versorgung des Niederspannungsbordnetzes mit Nebenverbraucher und zum Laden der Hochvoltbatterie (bei batterieelektrischen- und Plug-In-Hybridfahrzeugen) Für die Umformung des elektrischen Stroms gibt es im Wesentlichen fünf verschiedene Methoden, die in Abbildung 2-29 ersichtlich sind. [14]

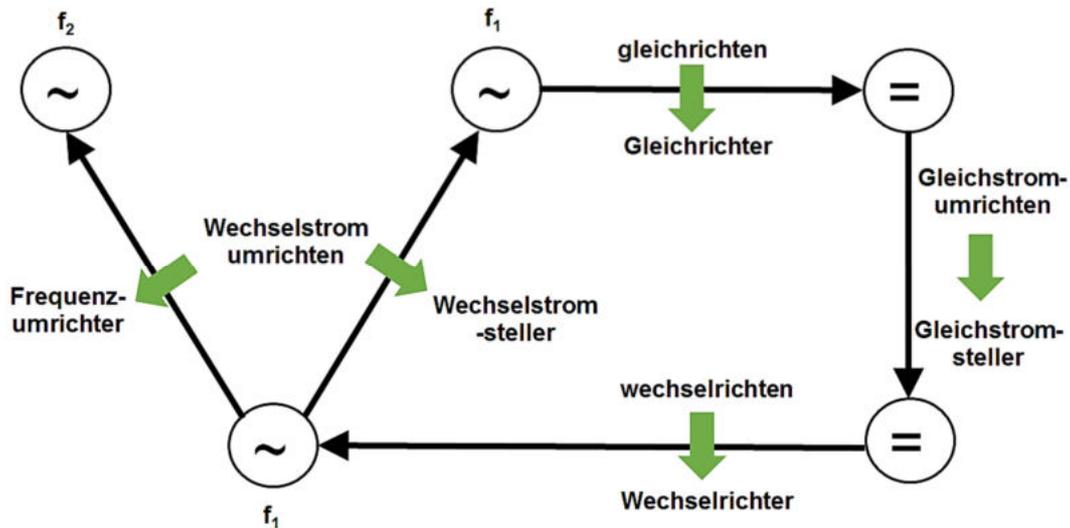


Abbildung 2-29: Möglichkeiten der Umformung mit verschiedenen Stromrichtern [14]

1. **Wechselrichten**
Gleichspannung in Wechselfspannung (DC/AC Wandler): Dies wird mit einem Wechselrichter realisiert, welcher den Wechselstrom für den Antrieb aus dem Gleichstrom der Batterie mit regelbarer Amplitude und Frequenz generiert.
2. **Gleichrichten**
Wechselfspannung in Gleichspannung (AC/DC Wandler): Aus einer ein- oder mehrphasigen Wechselfspannung wird eine Gleichspannung erzeugt. Zur Umformung werden entsprechende Gleichrichter verwendet. Zum Beispiel ein Brückengleichrichter.
3. **Gleichstrom-Umrichten**
Gleichspannung in Gleichspannung (DC/DC Wandler): Hier wird die Umwandlung einer Gleichspannung in eine Gleichspannung mit anderer Spannung und Strom durch einen Gleichstromsteller vorgenommen. In Abhängigkeit davon, ob die Eingangsspannung auf ein niedrigeres oder höheres Spannungsniveau umgesetzt werden soll, wird er als Tiefsetz- oder Hochsetzsteller bezeichnet. Auch Kombinationen aus beiden sind möglich - eine Eingangsspannung kann wahlweise nach unten und oben transformiert werden.
4. **Wechselstrom-Umrichten**
Wechselfspannung in Wechselfspannung (AC/AC Wandler): Dabei wird zwischen Wechselstromsteller und Frequenzumrichter unterschieden. Bei einem Wechselstromsteller wird nur die Spannung geändert, während die Frequenz beibehalten wird. Mit dem Frequenzumrichter wird die Frequenz und häufig auch die Spannung verändert.

In elektrischen und elektrifizierten Antriebssteuerungen erfolgt eine Kombination dieser Grundfunktionen. Ein klassisches Anwendungsbeispiel für die Verwendung von Stromrichtern in Elektro- und Hybridfahrzeugen wird in Abbildung 2-30 gezeigt.

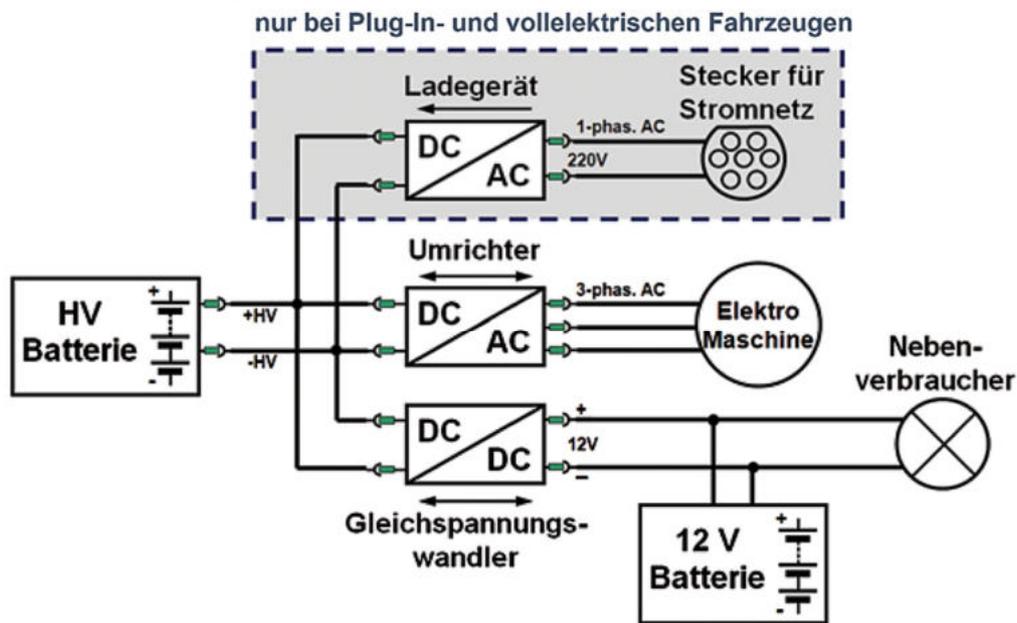


Abbildung 2-30: Beispiel für die schematische Verschaltung von Stromrichtern für Elektro- und Hybridfahrzeuge [7]

Der Umrichter (Inverter) dient zum Betrieb der elektrischen Antriebsmaschine. Dieser ist eine Kombination aus Wechselrichter (1) und Gleichrichter (2). Der Umrichter muss bidirektional ausgeführt sein. Das bedeutet der Energiefluss zwischen Batterie und E-Maschine kann in beide Richtungen erfolgen. Für die Funktion „Antrieb“ stellt er aus dem Gleichstrom der Batterie den Drehstrom für die Traktionsmaschine zur Verfügung. Für die Funktion „Rekuperation“ wird der erzeugte Wechselstrom zurück in Gleichstrom verwandelt. Bei der Versorgung des 12-Volt-Bordnetzes und der Niederspannungs-Nebenverbraucher ist die Hauptenergieflussrichtung von der Hochvoltbatterie zur Niedervoltbatterie. Für einige Systemanforderungen kann der Energiefluss jedoch auch in beide Richtungen des DC/DC-Wandlers erfolgen. Dies ist beispielsweise der Fall bei einer externen Starthilfe für die VKM eines Hybridfahrzeugs aus dem 12-Volt-Bordnetz. [7]

Plug-In-Hybride sowie rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sind zusätzlich mit einem On-Board-Ladegerät ausgestattet, um die Wechselspannung des Stromnetzes in eine geeignete Gleichspannung zum Laden der Hochvoltbatterie umzuwandeln. Eine andere Methode besteht darin, die HV-Batterie direkt mit Gleichstrom zu laden. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht jedes Fahrzeug über diese Schnellladefunktion mit Gleichstrom verfügt. Im Kapitel „6.3.3 Ladetechnik“ werden die verschiedenen Lademethoden näher beschrieben. [7] [15]

Leistungselektronische Verschaltung

Um die mehrphasige Wechselspannung bereitzustellen, werden im Wechselrichter Leistungshalbleiter verwendet. Durch schnelles ab- und zu schalten der Spannung kann die Frequenz mittels Halbleiter geregelt werden. Abbildung 2-31 zeigt hierfür eine schematische Darstellung der geschalteten Eingangsspannung und der geglätteten Ausgangsspannung. Die Glättung erfolgt durch Kapazitäten und Induktivitäten im Motor und Umrichter, deren Wirkungsweise ähnlich ist, wie Steifigkeiten und Massenträgheiten bei der Glättung der Verbrennungsimpulse in einer VKM. Im einfachsten Fall

könnten die Phasen der Traktionsmaschine mit einer frequenzvariablen Wechselspannung beaufschlagt werden, die einen blockförmigen, sinusähnlichen Verlauf aufweist. Die Zwischenkreisspannung U_z , welche in der Regel vom Batteriesystem gespeist ist, begrenzt die erreichbare Ausgangsspannung. [7] [15]

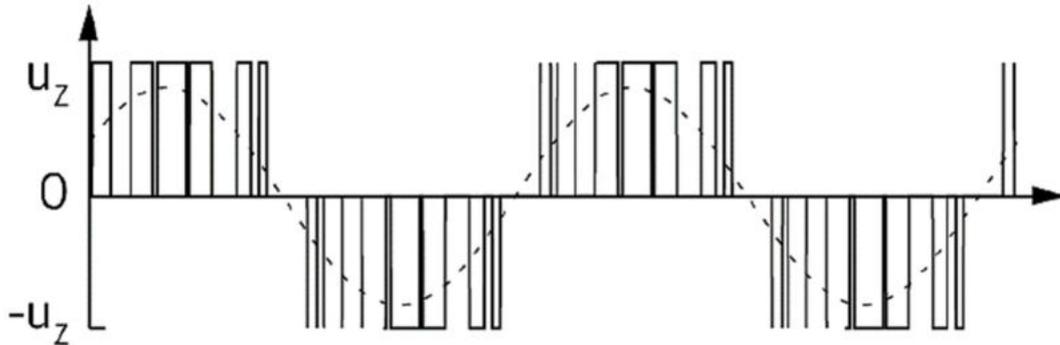


Abbildung 2-31: Schematische Ausgangsspannung einer Phase mit sinusförmigem Verlauf [15]

Um die Spannung entsprechend schnell zu- und abschalten zu können, werden Dioden eingesetzt. Bei einer Diode handelt es sich um ein elektronisches Bauteil, das den Stromfluss in nur eine Richtung zulässt und den Strom in die andere Richtung sperrt. Demnach gibt es eine Durchlass- und eine Sperrrichtung. [15]

Um eine Richtungsänderung des Wechselstromflusses zu ermöglichen, werden zwei Halbleiter (S_7 und S_8 , hier als einfacher Schalter dargestellt) zu einem Brückenweig zusammengeschaltet, siehe Abbildung 2-32. Die Änderung der Schalterstellung

- S_7 offen – S_8 geschlossen zu
- S_8 offen – S_7 geschlossen

entspricht dem Umpolen der Spule, z.B. zur Erzeugung der negativen Halbwelle eines Wechselstromes, zur Änderung der Drehrichtung eines Gleich- oder Wechselstrommotors oder, bei gleicher Drehrichtung, zur Umstellung von Motor- auf Generatorbetrieb. Die schematisch dargestellte Spule (Wicklung) der Maschine verbraucht entweder Strom (Motorbetrieb) oder sie generiert eine Spannung (Generatorbetrieb). [15]

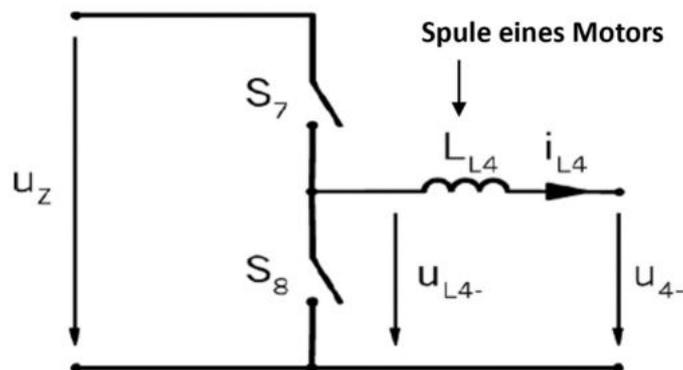


Abbildung 2-32: Prinzip-Schaltbild eines Brückenweigs als Gleichstromsteller [15]

Eine häufig verwendete Verschaltungs-Topologie ist in Abbildung 2-33 ersichtlich. Diese Variante wird auch als B6-Brückenschaltung bezeichnet. Dabei sind insgesamt sechs Leistungshalbleiterelemente in drei gleichartigen Brückenabzweigungen miteinander verbunden. Zwei Halbleiter und zwei Dioden bilden jeweils einen Zweig für eine Wechselstromphase des Drehstrommotors. Die Halbleiter sind die Leistungshalbleiter, wie bei S7 und S8 in Abbildung 2-32 dargestellt. Die Dioden geben mit kleinen Steuerströmen und kleinen Spannungen die hochfrequenten Ein- und Ausschaltbefehle für die Leistungshalbleiter. Freilaufdioden schützen vor Überspannung beim Abstellen einer induktiven Gleichstrombelastung, wie beispielsweise beim Elektromotor. [32]

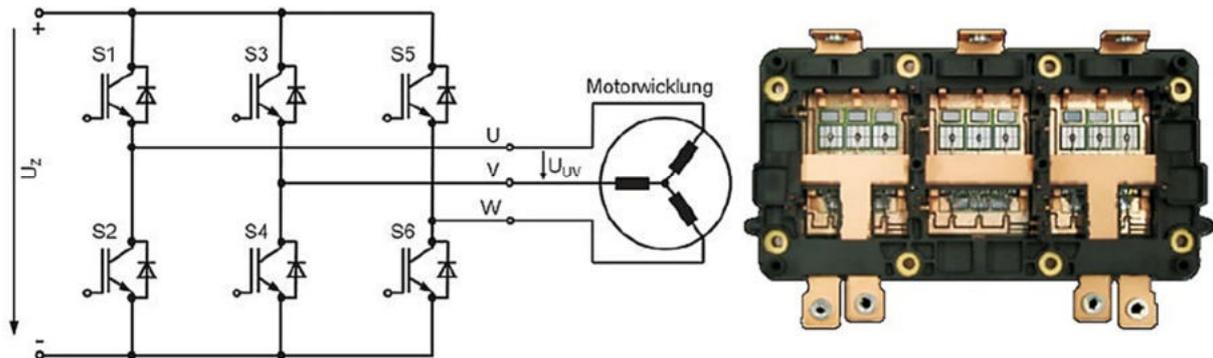


Abbildung 2-33: Dreiphasige Brückenschaltung (links) mit IGBT-Modul (rechts) [7] [32]

Jedes Schaltungspaar speist eine Phase (U, V und W) der elektrischen Maschine. Beide Schalter eines Stromkreispaares dürfen niemals stromführend sein, da ansonsten ein Kurzschluss entsteht und der Stromkreis beschädigt wird. Dies bedeutet, dass in jedem Brückenweig entweder der obere oder der untere Schalter stromleitend ist, z. B. S1=ein (leitend) und S2=aus (nicht leitend). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Halbleiter-Elemente eine bestimmte Zeit (Nanosekunden) zum vollständigen Sperren und Leiten benötigen. In Abhängigkeit der Schalterstellungen kann die Außenleiterspannung U_{UV} der elektrischen Maschine verschiedene Spannungswerte annehmen. Die Zwischenkreisspannung wird mit U_z bezeichnet und begrenzt die erreichbare Ausgangsspannung der Verschaltung. Dieser Zwischenkreis wird vom Batteriesystem gespeist, das allerdings eine variable Klemmenspannung aufweist, aufgrund von verschiedenen Temperaturen, Ladezuständen und anderen Parametern. Eine konstante oder an den Bedarf anpassbare Zwischenkreisspannung bringt Vorteile, sodass in manchen Fällen ein DC/DC-Wandler zur Anhebung der variablen Batteriespannung auf ein höheres Niveau eingesetzt wird. In der Regel kommen heute nur noch Wechselrichter mit einem Gleichspannungszwischenkreis zum Einsatz. [32]

Halbleiter-Bauelemente

Das Funktionsprinzip der Stromrichter basiert auf schnell schaltenden Elektronikkomponenten. Es handelt sich im Wesentlichen um möglichst verlustarme Leistungshalbleiter, dessen Aufgabe es ist, den elektrischen Stromfluss wahlweise weiterzuleiten oder zu unterbrechen. Um die Verluste bei der Umwandlung zu minimieren, werden die Halbleiterelemente in der Regel als elektronische Schalter ausgeführt, die hohe Ströme schalten können. Allerdings treten beim Schalten selbst und bei der Stromführung im eingeschalteten Zustand Verluste auf, wodurch Wärme entsteht, welche über ein geeignetes Kühlsystem abgeführt werden muss. Die zulässige Kühlmitteltemperatur legen die Halbleiter-Bauelemente fest. [62]

Im Material des Halbleiters werden die Leistungsströme im Nanosekundenbereich ein- und ausgeschaltet. Durch den Innenwiderstand erfolgt bei jeder Schaltung auch ein Temperaturimpuls und damit ein Ausdehnungsimpuls im Material. Die Halbleitermaterialien ermüden dabei, ganz ähnlich einer thermomechanischen Belastung eines mechanischen Bauteils. Im Material bilden sich Fehlstellen und Mikrorisse, die über die Betriebsdauer wachsen und nach einer entsprechende Betriebsdauer zum Versagen des Halbleiters führen. Leistungselektronische-Halbleiterelemente sind demnach Verschleißteile.

Das Atmen und die Mikrorissbildung wird verstärkt durch die Wärmezyklen des Fahrbetriebs, welcher die Materialien zusätzlich ausdehnen und zusammenziehen lässt. Wenn sich einmal Mikrorisse gebildet haben, schreitet der Alterungsprozess rasch voran. Der Stromfluss konzentriert sich auf verbleibendes ungestörtes Material ohne Risse. Dort finden allerdings stärkere Erregungen und Dehnungen statt. Ein geschädigtes Halbleiterelement kann und wird dann abrennen oder explosionsartig zerreißen. Kaputte Halbleiter-Elemente können prinzipiell ersetzt werden, indem neue IGBTs oder MOSFETs eingelötet werden. Eine Reparatur macht dann Sinn, wenn nach einer relativ kurzen Betriebsdauer eines dieser Elemente geschädigt wird und auf einen Schaden aufgrund eines Qualitätsmangels dieses Elementes geschlossen werden kann. Ähnlich verhält es sich bei defekten Batteriezellmodulen. Bei hoher Kilometerleistung eines Fahrzeugs ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass nach einem Halbleitertausch rasch weitere Halbleiter defekt werden.

In elektrischen Antriebssystemen kommen als Leistungshalbleiter-Bauelemente Dioden, Metall-Oxid-Silizium-Feldeffekt-Transistoren (MOSFET), IGBTs (Insulated-Gate-Bipolar-Transistoren) und als neueste Technologie SiC (Siliziumcarbid)-MOSFETs zum Einsatz. Abbildung 2-34 zeigt die schematischen Schaltbilder von einem MOSFET (links), IGBT (Mitte) und einer Diode (rechts). [15]

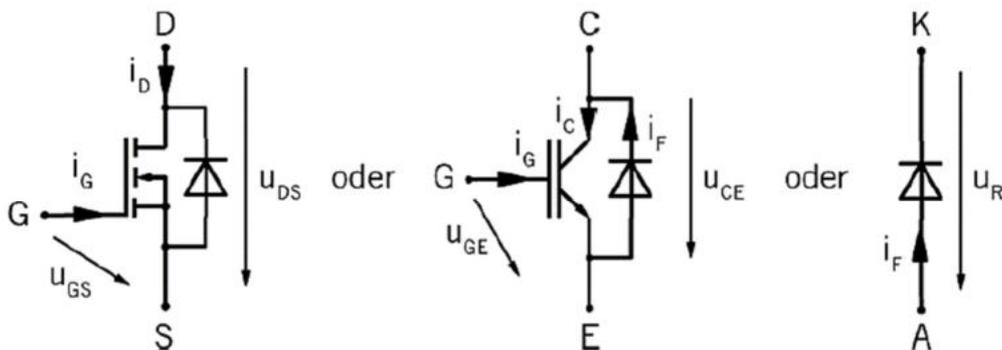


Abbildung 2-34: Prinzip-Schaltbilder von einem MOSFET (links), einem IGBT (mitte) und Diode (rechts) [15]

Aufgrund der einfachen Ansteuerung und der geringen Schaltverluste können mit einem MOSFET sehr hohe Schaltfrequenzen realisiert werden. Allerdings nimmt der Widerstand mit steigender Sperrspannung zu, sodass diese bei Spannungen bis 200 Volt zur Anwendung kommen. Der IGBT kann im Vergleich zu einem MOSFET mit der gleichen Chipfläche statisch wesentlich höhere Ströme übertragen. Der IGBT hat jedoch höhere Ausschaltverluste und verliert daher mit steigender Schaltfrequenz seine Vorteile gegenüber dem MOSFET. Ein weiterer Vorteil des IGBT ist, dass im Falle einer Störung in der Schaltung die Energiezufuhr kontrolliert, unterbrochen werden kann. Für Umrichter in elektrifizierten Antriebssystemen kommen in aktuellen ausgeführten Serienantrieben typischerweise IGBTs zum Einsatz. [62]

MOSFETs werden hingegen bei geringeren Batteriespannungen beziehungsweise bei geringeren Leistungen verwendet. So werden bei Gleichrichtern (DC/DC-Wandler) und On-Board-Ladegeräte vorwiegend MOSFETs in den Schaltungen eingesetzt. Da sowohl im leitenden Zustand ein Spannungsabfall auftritt als auch im Sperrzustand ein Strom fließt, entstehen Verluste. Sie setzen sich im Allgemeinen aus Durchlass-, Sperr- und Schaltverlusten zusammen und werden in Wärme umgewandelt, welche abgeführt werden muss, um thermische Beschädigungen an den Leistungshalbleiter zu verhindern. [62]

Der Einsatz von Siliziumcarbid (SiC) anstelle von Silizium (Si) als Halbleitermaterial ermöglicht höhere Chiptemperaturen und dadurch höhere Leistungsdichten. Die Kosten sind jedoch höher als bei der Verwendung eines Standard-Halbleitermaterials wie Silizium. Für den automotiven Bereich wird erwartet, dass mittelfristig SiC verstärkt zum Einsatz kommt. [62]

Elektronischer Aufbau der Leistungselektronik im Fahrzeug

In Abbildung 2-35 ist der schematische elektronischer Aufbau einer Leistungselektronik für ein elektrisches Antriebssystem mit 400-Volt-Bordnetzspannung dargestellt. Als Traktionsmaschine dient hier beispielhaft eine Permanentterregte Synchronmaschine. Das Hochvoltbatteriesystem ist dabei über den Gleichspannungszwischenkreis mit dem Wechselrichter verbunden. Dieser Zwischenkreis dient als Kurzzeit-Energiespeicher und ist im Fahrzeugbereich in der Regel als Zwischenkreiskondensator ausgeführt. Dadurch kann die schwankende Zwischenkreisspannung, welche durch die Batterieklemmspannung verursacht wird, ausgeglichen werden. In Abhängigkeit von den jeweiligen Leistungen und Spannungen werden als Leistungshalbleiter einzelne IGBTs zu einem oder mehreren gekühlten Modulen zusammenschaltet. Die Steuerplatine der Leistungselektronik enthält die Algorithmen für Drehzahl- und Drehmomentregelung, die Ansteuerung zum Wechselrichter, das Einlesen und die Auswertung der Sensormessdaten sowie die Schnittstelle zum überlagerten Fahrzeugsteuergerät mittels CAN-Bus-Verbindung. [7]

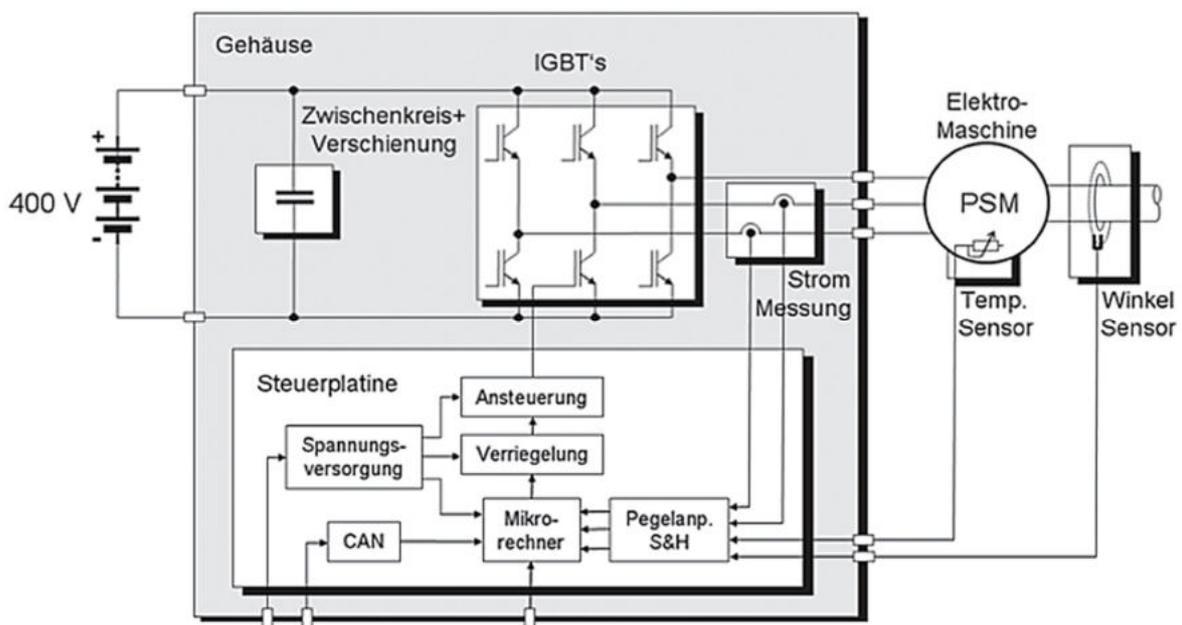


Abbildung 2-35: Prinzipdarstellung einer Leistungselektronik eines elektrischen Antriebssystems [7]

Für den sicheren und korrekten Betrieb der elektrischen Maschine müssen mehrere relevante Größen messtechnisch erfasst und an das Steuerungssystem übermittelt werden. Zu diesem Zweck werden von der elektrischen Maschine Temperatur- und Rotorpositionssignale sowie Messwerte der Ströme auf zwei Phasen von Sensoren erfasst. Das durch den Fahrerwunsch vorgegebene Drehmoment wird dabei über Drehmomentmodelle im Mikrorechner in Motorstellgrößen, wie Spannungen, Ströme und Frequenzen umgerechnet und daraus die Ansteuerung der IGBTs berechnet. [7]

Zur Ansteuerung der Elektromaschine über die leistungselektronische Verschaltung wird häufig die sogenannte Pulsweitenmodulation (PWM) verwendet, siehe Abbildung 2-31. Bei dieser Art der Steuerung wird die elektrisch träge Motorwicklung mit einem schnellen Wechselsignal versorgt. Die resultierende Spannung steigt dabei mit zunehmender Einschaltdauer. Mit dieser Art von Verschaltung lassen sich höchste Regelungsqualitäten erzielen, die allerdings mit einem hohen Beschaltungsaufwand der Halbleiter-Elemente verbunden sind. Bei Einsatz einer weiteren elektrischen Maschine muss eine zusätzliche Leistungselektronik in das Antriebssystem integriert werden. Bei leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen sind die Wechselrichter der beiden elektrischen Maschinen in der Regel im selben Gehäuse untergebracht. [7]

Aufbau und Komponenten im Fahrzeug

Abbildung 2-36 zeigt ein ausgeführtes Beispiel einer Leistungselektronik mit den Hauptkomponenten sowie den inneren Aufbau des bestückten Halbleiter-Modulträgers. Alle inneren Bauteile sind in einem abgedichteten Aluminium-Gehäuse untergebracht. Im Kern der Leistungselektronik befinden sich drei Silizium-Leistungsmodule, die zu einem typischen Wechselrichter verschaltet sind und in einem Modulträger integriert sind. Die verschalteten Module werden im Modulträger von beiden Seiten gekühlt und so untergebracht, dass die Gatetreiberplatte direkt auf die Kontaktpins der Leistungsmodule aufgesteckt werden kann. Weitere wichtige Komponenten des Wechselrichters sind die Filtereinheit am Gleichstrom-Eingang, die Zwischenkreiskondensatoren, der Phasenanschluss für die Wechselstrom-Kontaktierung der elektrischen Maschine und der Phasenstromsensor. Die Gesamthöhe des kompletten Bauteils beträgt dabei, trotz der beidseitigen Kühlung und der kleinen Grundfläche, nur 82 mm bei einem Gesamtgewicht von 8 kg. [46]

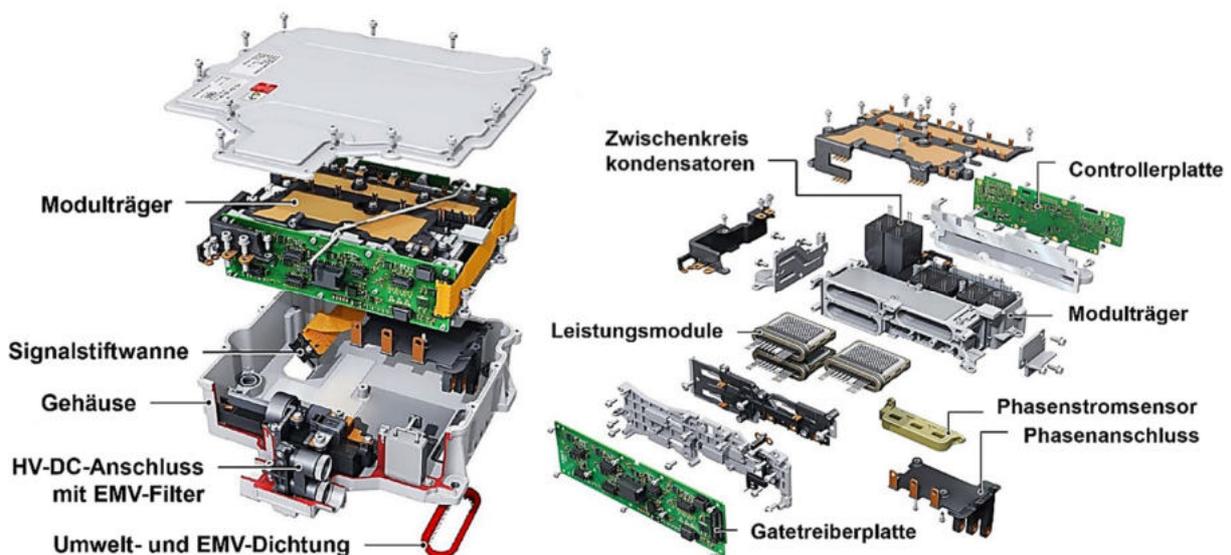


Abbildung 2-36: Aufbau der Leistungselektronik des Audi e-trons [46]

Die Controllerplatte (Steuerplatine) ist platzsparend auf der Rückseite des Modulträgers montiert, während sich die zugehörige Signalstiftwanne im Gehäuseboden befindet. Auf dieser Controllerplatte sind die Regelfunktionen der elektrischen Maschine hinterlegt. Die Regelung erfolgt dabei hochdynamisch, sodass 10.000 mal pro Sekunde Sensordaten abgefragt werden und neue Stromwerte für die Elektromaschine eingestellt werden. Auf diese Weise kann eine optimale Leistungsausnutzung, insbesondere im dynamischen Betrieb, erreicht werden. Um bestimmte Eingriffe ohne Verzögerung und ohne Kommunikation mit dem Fahrzeugsteuergerät durchführen zu können, sind einige Fahrzeugfunktionen direkt in die Leistungselektronik integriert. Eine abgestimmte Hardware erlaubt es, die Verbindung mit einem Flachbandkabel zu realisieren. Zur Abdichtung des Phasenanschlusses an die E-Maschine wird eine spezielle Umwelt- und EMV- (Elektro-Magnetische-Verträglichkeit) Dichtung eingesetzt. So wird sichergestellt, dass die Toleranzen der elektrischen Maschine ausgeglichen werden und die Systemabschirmung sowie die Masseanbindung erhalten bleiben. Der Gleichspannungswandler zur Speisung des Niedervolt-Bordnetzes ist hier nicht in der Leistungselektronik enthalten, sondern als eigenes flüssigkeitsgekühltes Bauteil ausgeführt. [46]

Im Vergleich zum vorherigen Aufbau in Abbildung 2-36 zeigt Abbildung 2-37 den Aufbau von zwei weiteren ausgeführten Leistungselektroniken. Der Hauptunterschied liegt im Wesentlichen im schichtweisen Aufbau der einzelnen Komponenten. So wird bei der linken Leistungselektronik das IGBT-Modul nicht in einem Modulträger integriert. Auch bei diesem Ausführungsbeispiel ist der Gleichspannungswandler als eigene Komponenten ausgeführt. Bei der rechten Leistungselektronik hingegen sind Komponenten wie Wechselrichter, Gleichspannungswandler und das On-Board-Ladegerät in einem einzigen Gehäuse untergebracht. Eine solche kompakte Bauweise ermöglicht zwar eine platzsparende Anordnung im Antriebssystem, erhöht aber auch den Aufwand für die Demontage bei eventuellen Reparaturen der einzelnen Komponenten. Diese gezeigten Leistungselektroniken haben jedoch keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung der Ausführungsmöglichkeiten. [11] [48]

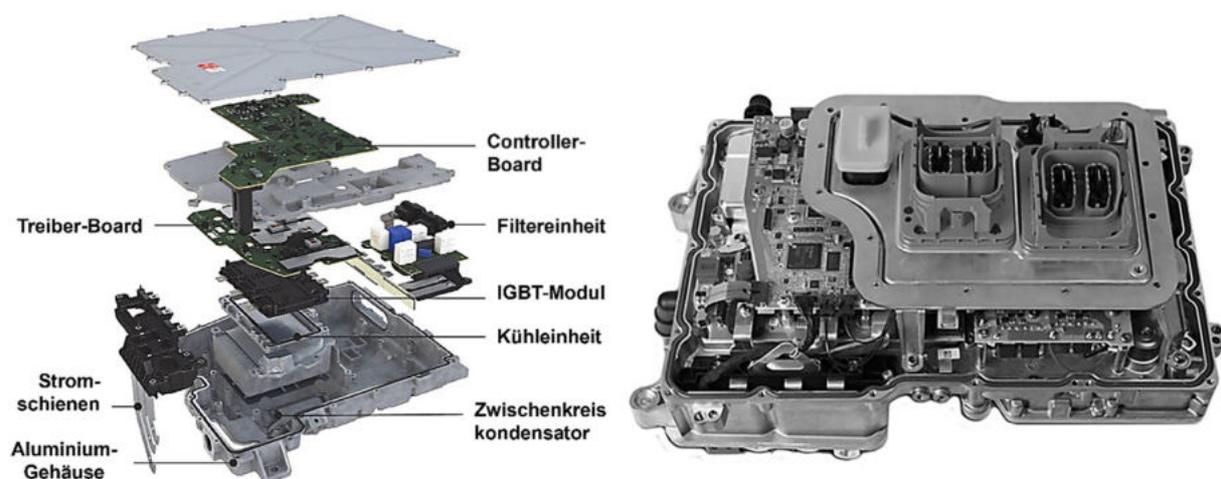


Abbildung 2-37: Aufbau der Leistungselektronik der MEB-Plattform von VW (links) und des BMW i3 (rechts) [11] [48]

2.4 Getriebe

Die Aufgabe eines Getriebes besteht darin, die vom Motor bereitgestellten Drehmoment- und Drehzahlen zu wandeln.

Auch batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge nutzen in den meisten Fällen Getriebeübersetzungen, um die Drehmomente und Drehzahlen der elektrischen Maschine an die Anforderungen am Rad anzugleichen. In den meisten Anwendungen kommen derzeit Ein-Ganggetriebe zum Einsatz. Die Wahl der Übersetzung ergibt sich primär aus der Maximaldrehzahl des Elektromotors und der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Damit ist auch die maximale Zugkraft beim Anfahren festgelegt. Wenn eine große Spreizung zwischen hoher Zugkraft und hoher Geschwindigkeit erforderlich ist, kann es sinnvoll sein, Zwei- oder Mehrganggetriebe für Elektrofahrzeuge zu verwenden. Dies kann beispielsweise bei Anforderungen an hohe Geschwindigkeiten für leistungsstarke Sportfahrzeuge der Fall sein. Darüber hinaus weisen z.B. Nutzfahrzeuge mit hoher Nutzlast und Fahrzeuge, die mit Anhängern häufig Steigungsfahrten ausüben, einen hohen Zugkraftbedarf auf. [16]

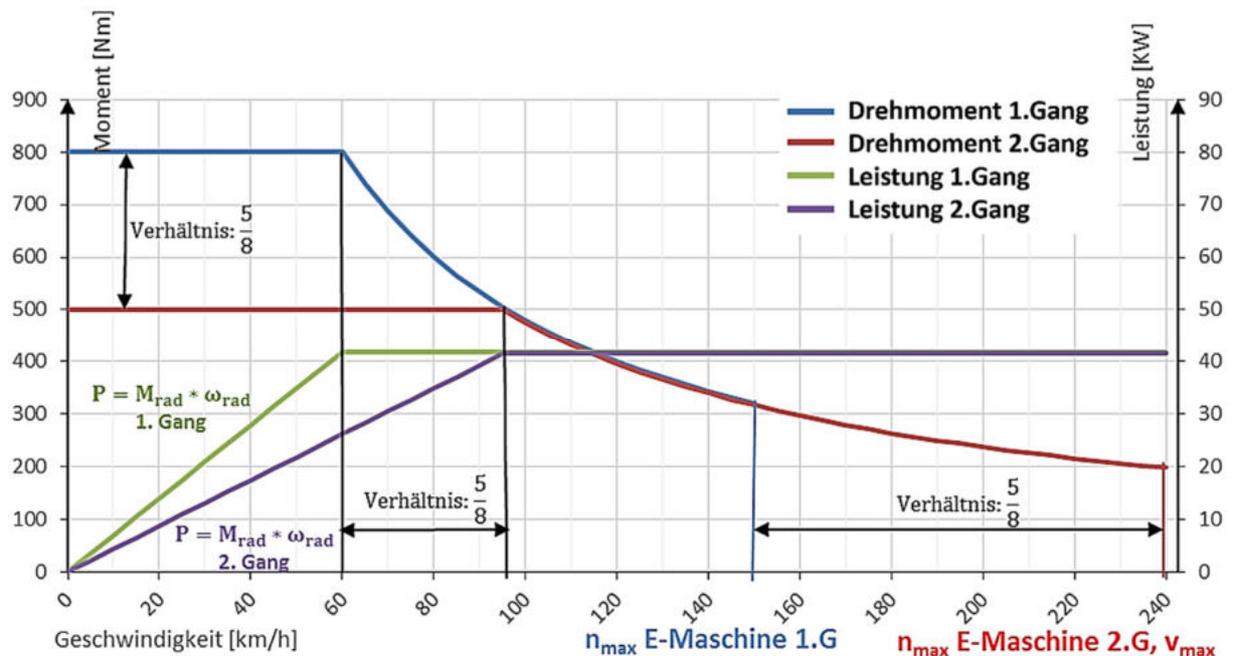


Abbildung 2-38: Drehmoment- und Leistungscharakteristiken einer PSM in Verbindung mit einem 2-Gang-Getriebe [14]

Abbildung 2-38 zeigt die Drehmoment- und Leistungsverläufe einer PSM in Verbindung mit einem 2-Gang-Getriebe. Bei Verwendung eines Zwei- oder Mehrganggetriebes kann im Überlappungsbereich jener Gang gewählt werden, bei dem die E-Maschine mit besserem Wirkungsgrad betrieben wird und damit etwas höhere Reichweiten erzielen. Es sei angemerkt, dass in der Praxis die Verbesserungen im unteren Prozentbereich liegen. [14]

Je höher die Drehzahl des Elektromotors, desto kleiner werden bei gleicher Leistung die Drehmomente des Motors. Damit können hochdrehende E-Motoren viel kompakter gebaut werden. Aufgrund elektromagnetischer Wirkungsgrade, Drehzahlgrenzen mechanischer Bauteile (z.B. Lager), Fliehkräften, Fertigungstoleranzen und Abfuhr von Verlustwärme (Kühlung) ergibt sich nach aktuellem Stand der Technik eine Maximaldrehzahl von ca. 14.000 U/min als guter Kompromiss für Traktionsmaschinen mit 400 Volt. Damit ergeben sich Übersetzungsverhältnisse bei Ein-Gang-Getrieben von Motor zu Rad von ca. 8-12. Dies wird konstruktiv meist durch ein 2-stufiges Eingang-

Getriebe mit Differential gelöst, oder durch ein Planetengetriebe, welches die Differentialfunktion bereits beinhaltet. [7] [14] [16]

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden beispielhafte Getriebeausführungen von Elektro- und Hybridfahrzeugen aufgezeigt. Diese haben jedoch keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung der Ausführungsmöglichkeiten.

2.4.1 Ausgeführte Getriebe für elektrische Achsantriebe

Im einfachsten Anwendungsfall bestehen die Übersetzungsstufen eines elektrischen Achsgetriebes aus schrägverzahnten Stirnrädern mit Kegelraddifferential in achsparalleler oder koaxialer Anordnung. Ein Achsgetriebe in achsparalleler Ausführung kann allerdings auch mit einem Planetengetriebe und Kegelraddifferential oder integrierten Leichtbau-Planetendifferential ausgeführt sein, welche über eine Stirradstufe mit dem Planetensatz gekoppelt sind. Eine weitere Ausführungsmöglichkeit stellen koaxial ausgeführte Planetengetriebe mit integriertem Leichtbau-Planetendifferential dar. Bei Verwendung eines koaxialen Doppelantriebs (2 E-Motoren, einen pro Rad, Back2Back oder Front2Front) wird die Differentialfunktion von jeweils einer elektrischen Maschine übernommen und es kann auf die jeweiligen Komponenten zur Erfüllung dieser Funktion verzichtet werden.

Konstruktive Ausführung mit Stirnradgetriebe

Abbildung 2-39 zeigt ein zweistufiges Eingang-Getriebe mit Kegelrad-Differential in koaxialer Bauweise von einem elektrischen Vorderachs Antrieb.

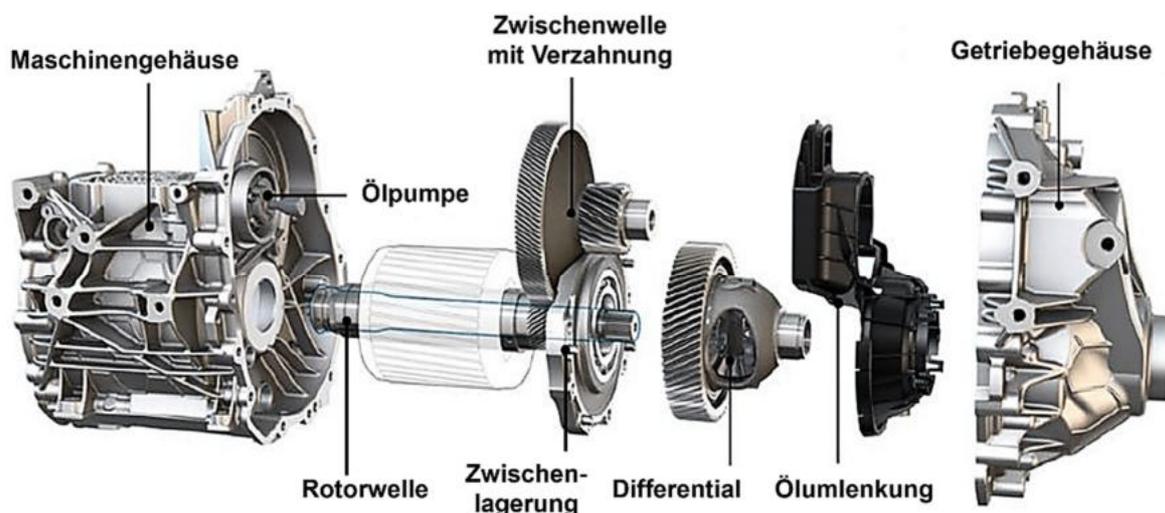


Abbildung 2-39: Ein-Gang-Stirnradgetriebe in koaxialer Ausführung von Volkswagen [63]

Als Übersetzungselemente kommen hier schrägverzahnte Stirnräder zum Einsatz. Dadurch kann je nach Fahrzeugmodell die Gesamtübersetzung ohne großen Aufwand geändert werden. Dadurch, dass die gezeigte Antriebsachse ein kombiniertes Kühlmittel (Wasser-Glykol) - und Ölkühlsystem zur Wärmeabfuhr vom Stator und Rotor verwendet, ist für den Ölkreislauf eine separate Ölpumpe erforderlich. Diese Pumpe ist im Maschinengehäuse untergebracht und wird über eine Zwischenwelle mit Verzahnung von der Rotorwelle mechanisch angetrieben. Zusätzlich zur Schmierfunktion der Getriebeelemente übernimmt das Öl auch die Kühlfunktion der elektrischen Maschine. Um das erwärmte Öl zu kühlen ist im Maschinengehäuse ein separater Wärmetauscher (Wärmeaufnahme

durch Wasser-Glykol-Gemisch) integriert. Dieses kombinierte Kühlsystem ermöglicht eine deutliche Erweiterung der Betriebsgrenzen der elektrischen Antriebsmaschine. Eine in das Getriebe integrierte Parksperre wird hier nicht verwendet, sondern die Antriebsachse wird im Stillstand mittels einer elektronisch aktivierten Parkbremse gesperrt. [63]

Konstruktive Ausführungen mit Planetengetriebe

Nachfolgende Abbildung 2-40 zeigt je ein Ausführungsbeispiel von einem nichtschaltbaren zweistufigen achsparallelen Planetengetriebe (links) sowie von einem koaxialen Planetengetriebe (rechts) mit integriertem Planeten-Leichtbaudifferenzial. Die Getriebebauweise mit achsparallelem Planetengetriebe (links) löst dabei den Zielkonflikt zur Ausführung eines zweistufigen Übersetzungskonzepts. Die erste Übersetzungsstufe ist als Planetenstufe realisiert, in der drei Planeten und ein radial freiliegendes Hohlrad Drehmoment sowie Drehzahl umwandeln. Das Sonnenrad ist über eine Verzahnung formschlüssig mit der Rotorwelle der elektrischen Maschine verbunden. Ein schrägverzahntes Stirnrad wird auf den Planetenträger der ersten Getriebestufe gepresst und greift dadurch in die Außenverzahnung des Planetenträger-Differenzials ein. [46]

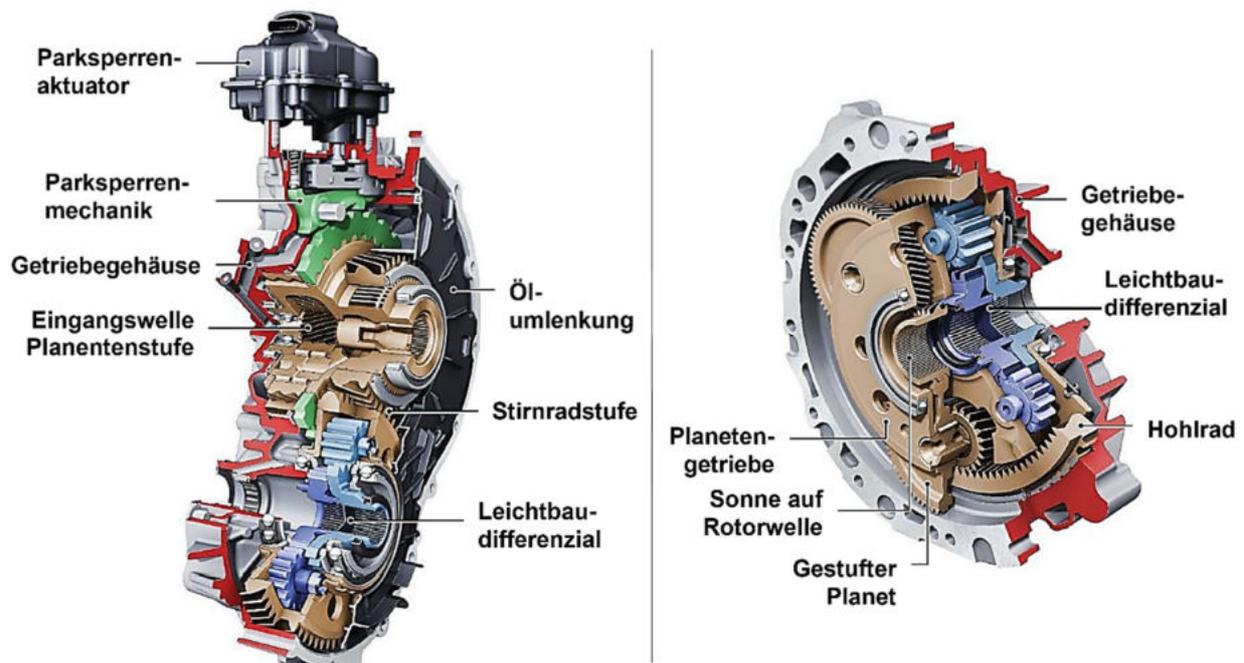


Abbildung 2-40: Achsgetriebe in achsparalleler (links) und koaxialer (rechts) Ausführung von Audi [46]

Die Differenzialfunktion wird von einem Leichtbau-Planetendifferenzial ausgeführt, welches das Antriebsdrehmoment über zwei gesteckte Flanschwellen auf die Antriebsräder aufteilt. Die Gesamtübersetzung (Verhältnis Motor- zu Raddrehzahl) dieses ausgeführten achsparallelen Achsgetriebes beträgt 9,2. [46]

Die Förderwirkung der Stirnradstufe in Kombination mit der Kunststoff-Ölumlenkungskomponente sorgt für eine ausreichende Versorgung aller erforderlichen Komponenten mit Schmieröl, ohne das eine zusätzliche Ölpumpe erforderlich ist. Dadurch, dass die Wärme vom Getriebe über Konvektion durch den Fahrtwind sowie über die wassergekühlten Lagerschilder der elektrischen Maschine abgeführt wird, ist kein eigener Ölkühler erforderlich. Bei dieser Ausführungsvariante ist zur Sicherung des Fahrzeugs im Stillstand eine in das Getriebe integrierte Parksperre verbaut. [46]

Die Getriebebauweise mit koaxialen Planetengetriebe in Abbildung 2-40 (rechts) weist gegenüber der achsparallelen Ausführung Vorteile in Hinblick auf den Bauraum auf. Das Sonnenrad des Planetengetriebes ist über eine Verzahnung auf die Rotorwelle der elektrischen Maschine aufgepresst und greift in die Außenverzahnung der drei gestuften Doppelplaneten ein. Der zweite Verzahnungsbereich der Doppelplaneten kämmt dabei mit dem im Getriebegehäuse schwimmend und verdrehsicher gelagerten Hohlrad. Durch diese zweistufige Getriebeausführung wird eine Gesamtübersetzung von 9,08 erreicht. Im Gegensatz zur Variante mit Stirnradgetriebe kann bei Verwendung eines Planetengetriebes als Übersetzungselement das Gesamtübersetzungsverhältnis nicht so einfach verändert werden. Der Planetenträger ist wiederum mit einem Leichtbau-Planetendifferenzial gekoppelt. Die Ausgleichsplaneten des Differenzials sind dabei bauraumoptimiert in die Zwischenräume der Doppelplaneten integriert. Der mechanische Abtrieb zu den Antriebsrädern wird ebenfalls durch zwei steckbare Flanschwellen umgesetzt. Aufgrund der koaxialen Bauweise ist die Rotorwelle der E-Maschine als Hohlwelle ausgeführt, um die Flanschwellen auf der E-Maschinenseite durchführen zu können. [46]

Konstruktive Ausführung eines 2-Gang-Getriebes

Zur Realisierung eines Allradantriebs bei Hybridfahrzeugen wird häufig die P4-Konfiguration (Achsgeteilter Hybrid) eingesetzt. Abbildung 2-41 zeigt eine solche Konfiguration anhand einer elektrischen Vorderachse mit schaltbarem Zweigang-Getriebe. Die Kombination der elektrischen Maschine mit einem 2-Gang-Getriebe ermöglicht hohe Drehmomente an den Vorderrädern bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten von bis zu 250 km/h. [65]



Abbildung 2-41: Aufbau des schaltbaren Zweiganggetriebes der elektrischen Antriebsachse des BMW i8 [6] [65]

Des Weiteren wird durch die zusätzliche Getriebeübersetzung des Elektromotors sowohl die Beschleunigung als auch die Gesamteffizienz verbessert und somit die rein elektrische Reichweite erhöht. Zusätzlich ermöglicht die elektrische Zweigangachse, die E-Maschine und alle zugehörigen Systeme zu verkleinern, wodurch die Masse reduziert wird und dadurch die Effizienz weiter erhöht. Die Schaltaktuatorik befindet sich auf der Eingangswelle und nicht in der Mitte des Getriebes auf der Zwischenwelle. Dies ermöglicht eine schmale platzsparende Ausführung der Getriebeeinheit. Die Software-Steuerung der E-Maschine und der Synchronisierungsmechanismus bewirkt selbst bei sehr hohen Drehzahlen der Eingangswelle einen problemlosen Schaltvorgang. [65]

2.4.2 Ausgeführte Hybridgetriebe

Je nach Hybridisierungsgrad, der Antriebsarchitektur sowie des Fahrzeugtyps bieten sich viele verschiedene Möglichkeiten zur konstruktiven Gestaltung von Hybridgetrieben an. Das Getriebe in einem hybriden Antriebsstrang besteht aus einer Kombination von mechanischen Getriebeelementen und mindestens einer elektrischen Maschine. Selbst eine Mikro-Hybridisierung nimmt Einfluss auf das Getriebe. Zur Umsetzung der Start-Stopp-Funktion mit riemengetriebenen Startergenerator wird beispielsweise eine elektrisch betriebene Druckversorgung oder ein Impulsspeicher für Wandler-Automatikgetriebe benötigt. Bei einem auf der Kurbelwelle integrierten Starter-Generator ist es möglich, dass der Rotor der elektrischen Maschine die primäre Masse eines Zweimassenschwungrades ersetzt. Hybridfahrzeuge sind wahlweise mit einem Vorgelege-Getriebe, Planetenautomatikgetriebe oder einem stufenlosen Getriebe ausgestattet. [14] [16]

Konstruktive Ausführung paralleler Hybridgetriebe

Für Parallelhybride können grundsätzlich alle Arten von Vorgelege-Getriebe eingesetzt werden. Zur verbrauchsgünstigsten Betriebs- und Schaltstrategie kommen überwiegend automatisierte Getriebe zum Einsatz, wie Automatisierte-Handschaltgetriebe sowie Doppelkupplungsgetriebe. Eine weitere Ausführungsform eines parallelen Hybridgetriebes stellen Automatikgetriebe mit Planetensätzen dar, wobei durch die E-Maschine der hydraulische Drehmomentwandler entfallen kann. [32]

Hybridfahrzeuge werden häufig mit einer P2-Hybridarchitektur ausgeführt, da diese viele Funktionalitäten ermöglicht, z. B. rein elektrisches Fahren, reines VKM-Fahren, Lastpunktverschiebung, Start-Stopp, Boosten, Segeln und Rekuperation. Bei der P2-Ausführung ist die elektrische Maschine vor dem Getriebe angebracht, wodurch wenig zusätzlicher Bauraum benötigt wird. Der besondere Vorteil der Integration der elektrischen Maschine in P2-Konfiguration im Vergleich zu einer Hybridstruktur mit fester Kopplung der E-Maschine an das Getriebe ist, dass in allen Betriebsarten (rein elektrisches Fahren, Hybridbetrieb und Batterieladung mit dem Verbrennungsmotor) die Übersetzungen des Getriebes genutzt werden können und die E-Maschine auf der „schnelldrehenden“ Seite des Getriebes sitzt. Dies führt zu einer relativ kompakten E-Maschine und einer erhöhten Gesamtenergieeffizienz. Im Gegensatz zur P2-Ausführung haben Hybridfahrzeuge mit P1- und P4-Architektur keine Auswirkungen auf das Getriebe. [14] [16]

- **Achtgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe**

Ein Doppelkupplungsgetriebe besteht aus zwei ineinander liegenden Schaltsträngen, sodass ein vollautomatischer Schaltvorgang ohne Zugkraftunterbrechung realisiert wird. Ein Strang übernimmt dabei die geraden Gangstufen und der andere Schaltstrang die ungeraden Gänge. Bei Verwendung eines Ganges wird in Abhängigkeit der Fahrsituation bereits der nächste Gang vorgewählt, der sich aber vorerst noch im Leerlauf bei geöffneter Kupplung befindet. Durch überlappendes Öffnen oder Schließen der beiden Kupplungen wird ein Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung vorgenommen. Die verwendeten Kupplungen können wahlweise als Trocken- oder als nasslaufende Kupplung ausgeführt sein. Durch den Einsatz von in Öl laufenden Lamellenkupplungen kann zum einen die thermische Belastung reduziert und zum anderen ein schnelles und präzises Schaltverhalten erzielt werden. [14]

Abbildung 2-42 zeigt den Aufbau eines Achtgang-Doppelkupplungsgetriebe mit integriertem Hybridmodul in P2-Konfiguration. Das Hybridmodul ist dabei zwischen Verbrennungskraftmaschine und Doppelkupplungsgetriebe direkt in die Kupplungsglocke integriert und beinhaltet die elektrische Maschine, Trennkupplung mit Torsionsdämpfer sowie die notwendige Aktuatorik. Dies führt jedoch zu einer erzwungenen Verlängerung des Bauraums. Die Trennkupplung ermöglicht das bedarfsgerechte An- oder Abkoppeln der Verbrennungskraftmaschine an den Antriebsstrang, sodass während dem rein elektrischen Fahren die Schleppverluste vom VKM vermieden werden können. Das Getriebe selbst besteht aus zwei Vorgelegewellen und einer Abtriebswelle. Diese Getriebeausführung ermöglicht alle üblichen Hybridfunktionen, wie die Start-Stopp-Funktion bis hin zum rein elektrischen Fahren. [14]

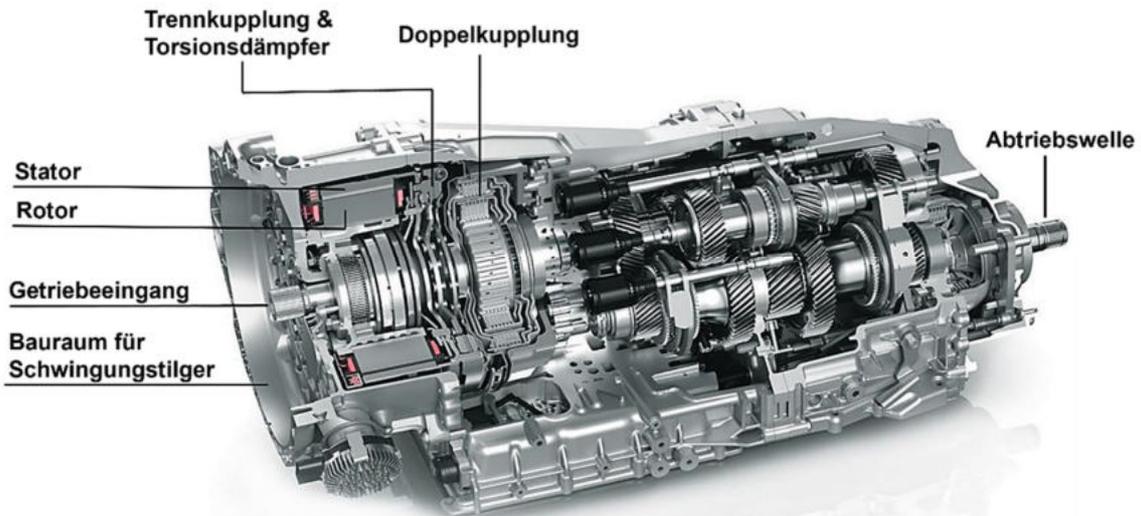


Abbildung 2-42: Aufbau eines Achtgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe von ZF und Porsche [14]

- **Sechsgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe (Quereinbau)**

In Abbildung 2-43 ist eine Ausführungsmöglichkeit von einem Sechsgang-Doppelkupplungsgetriebe in P2-Konfiguration dargestellt. Diese kompakte Bauweise wird typischerweise für einen Quereinbau eingesetzt. Neben dem zugkraftunterbrechungsfreien Schaltvorgang ist die Reduzierung der Zahnräder sowie der Übersetzungsstufen als Vorteil zu nennen. [7] [52]

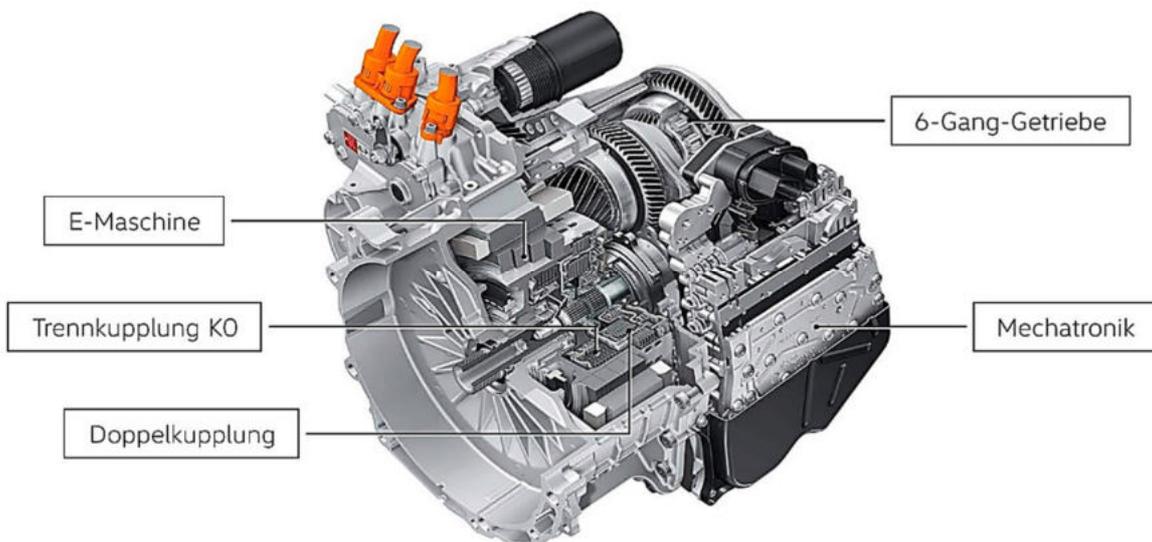


Abbildung 2-43: Aufbau Sechsgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen [64]

Die in das Getriebe integrierte elektrische Maschine bildet zusammen mit der Trenn- und Doppelkupplung das Hybridmodul. Die Trennkupplung ist dabei direkt im Rotor der E-Maschine angeordnet und ermöglicht dadurch die von der VKM unabhängige Nutzung der Elektromaschine. So können die Schleppverluste der VKM beim rein elektrischen Fahren vermieden werden und die Effizienz erhöht werden. Mit Ausnahme der mechanisch betätigten Parksperre wird das Getriebe vollständig über ein elektrohydraulisches Steuermodul (Mechatronik) gesteuert. Eine elektrisch angetriebene Ölpumpe speist dabei das System mit dem nötigen Öldruck. [52]

- **Achtgang-Hybrid-Automatikgetriebe**

Das Automatikgetriebe mit Planetensätzen stellt eine weitere Ausführungsvariante eines Hybridgetriebes dar. Der in konventionellen Automatikgetrieben integrierte hydrodynamische Drehmomentwandler entfällt in der Regel im Zuge der Elektrifizierung. In diesem neu gewonnenen Bauraum wird das Hybridmodul untergebracht, sodass eine Verlängerung der Baulänge nicht zwingend erforderlich ist. Ein Torsionsdämpfer, eine Trennkupplung für das rein elektrische Fahren sowie die E-Maschine bilden dabei das Hybridmodul. In Abbildung 2-44 ist die Integration des Hybridmoduls in P2-Konfiguration ersichtlich. [14]

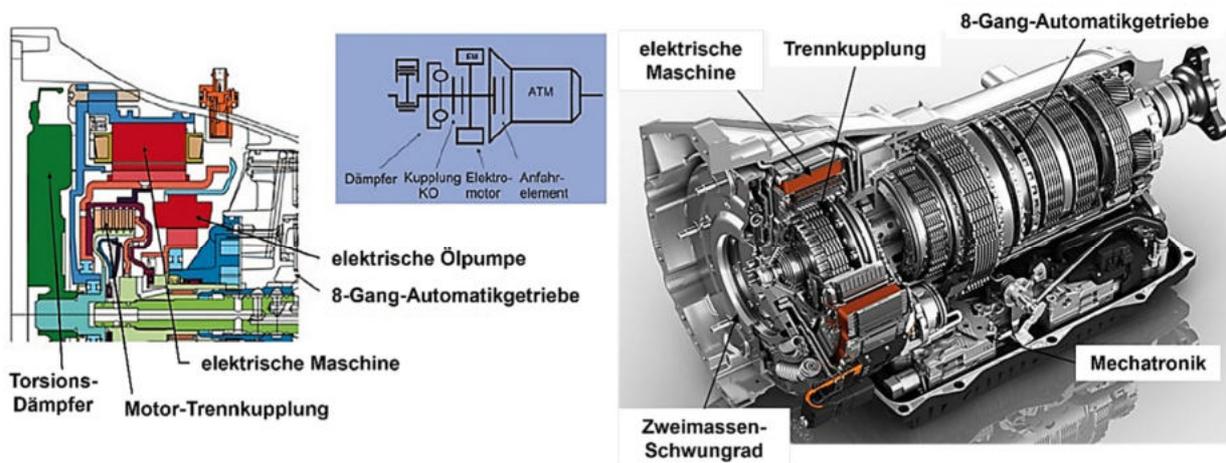


Abbildung 2-44: Aufbau eines 8-Gang-Hybrid-Automatikgetriebes von ZF und Porsche [14]

Der unterbrechungsfreie Schaltvorgang der einzelnen Gangstufen der Planetensätze erfolgt über hydraulische Lamellenkupplungen. Um das Getriebe auch im rein elektrischen Fahrbetrieb mit dem nötigen Öldruck zu versorgen, kommt eine elektrische Ölpumpe zum Einsatz. Dadurch, dass kein Drehmomentwandler mehr vorhanden ist, müssen dessen Funktionen nun von anderen Bauteilen kompensiert werden. So ist in der Regel ein weiterer Torsionsdämpfer erforderlich, um Drehungleichförmigkeiten zu entkoppeln. Zusätzlich wird eine bereits im Getriebe integrierte nasse Lamellenkupplung zur Drehzahlüberbrückung während des Anfahrvorgangs verwendet, die jedoch an die gestiegenen Beanspruchungen angepasst ist. Für das rein elektrische Fahren ist eine Motor-Trennkupplung erforderlich, um den abgestellten Verbrennungsmotor von der E-Maschine abzukoppeln und damit vom restlichen Antriebsstrang zu trennen. Dadurch werden im geöffneten Zustand dieser Kupplung die Schleppmomente der VKM weitgehend vermieden. [32]

- **Sonderform NFZ: Vorgelege-Hybridgetriebe mit automatisierter Schaltung**

Bei schweren Nutzfahrzeugen werden hauptsächlich automatisierte Handschaltgetriebe eingesetzt. Diese bieten Vorteile durch den einfachen Aufbau mit geringeren Massen und kleinen Leistungsverlusten. Beim automatisierten Schaltvorgang kommt es zu Zugkraftunterbrechungen, die jedoch durch den Einsatz von elektrischen Maschinen teilweise kompensiert werden können. Die Elektromaschine ist in der Regel vor dem Hauptgetriebe verbaut, so dass alle Möglichkeiten der Hybridfunktionen realisiert werden können. Dazu gehören Rekuperation, rein elektrisches Rückwärtsfahren, Start-Stopp-Funktion und sogar Leistungsunterstützung beim Beschleunigungsvorgang. Insbesondere wenn die elektrische Maschine im Generatorbetrieb eingesetzt wird, ist die Einbindung des Hybridmoduls in die Energieversorgung von Nebenaggregaten möglich. Abbildung 2-45 zeigt ein ausgeführtes automatisiertes Handschaltgetriebe mit P2-Integration der elektrischen Maschine für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen. Im Pkw-Segment finden solche Getriebeausführungen wenig Anwendung. Da werden vor allem Doppelkupplungs- und Automatikgetriebe für Parallelhybridfahrzeuge eingesetzt. [14]

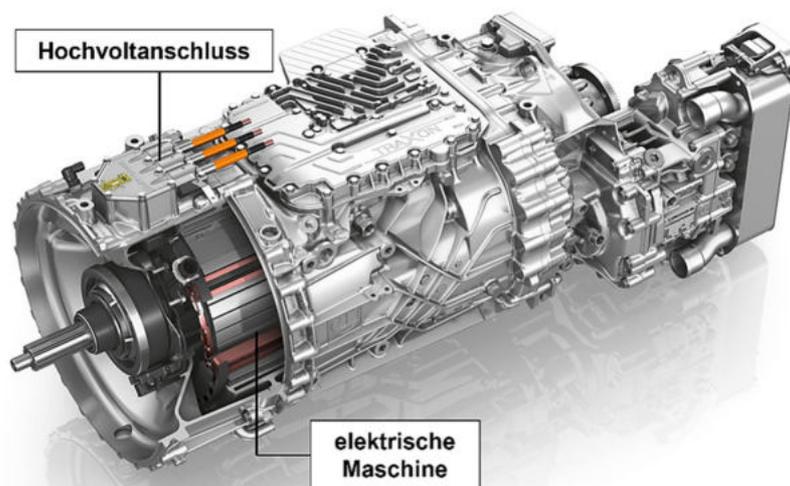


Abbildung 2-45: Automatisiertes Handschaltgetriebe mit elektrischer Maschine für schwere Nutzfahrzeuge [7]

Konstruktive Ausführung leistungsverzweigter Hybridantriebe

Für Hybridfahrzeuge mit leistungsverzweigter Antriebsarchitektur sind viele verschiedene Konzepte möglich, die sich in der Regel aus dem Verwendungszweck des Fahrzeugs sowie den markenspezifischen Anforderungen ergeben.

- **Zweifache Leistungsverzweigung (Two-Mode-System)**

Die einfache Leistungsverzweigung (One-Mode-System) ist eine Möglichkeit der Realisierung und wurde im Toyota Prius umgesetzt, siehe Kapitel "6.1.3 Hybrid-Elektrische-Antriebe, Ausgeführte Hybridfahrzeuge". Die Bezeichnung „One-Mode“ kennzeichnet dabei eine fixe Art der Leistungsverzweigung und „Two-Mode“ wird hingegen zur Charakterisierung von Hybridgetrieben mit zwei Arten der Leistungsverzweigung verwendet. In Abbildung 2-46 ist ein solches Two-Mode-Hybridgetriebe mit zwei Möglichkeiten der Leistungsverzweigung dargestellt. Im Unterschied zum One-Mode-System werden zwei stufenlose Betriebsarten verwendet, die mit vier mechanischen Getriebestufen überlagert sind, die durch drei Planetenradsätze ausgeführt sind. Ein Allradantrieb kann je nach Anforderungen über ein Verteilergetriebe, das dem Hybridgetriebe nachgeschaltet ist, realisiert werden. [14] [32]

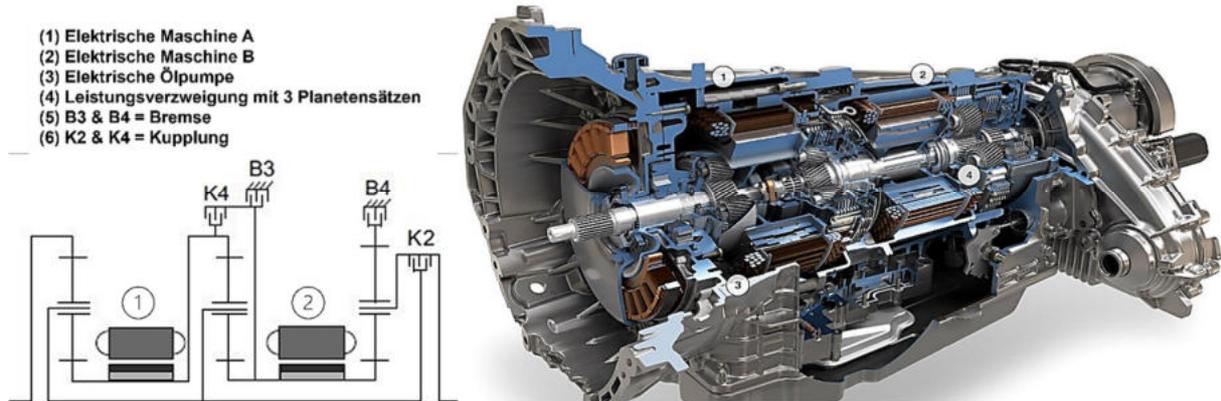


Abbildung 2-46: Aufbau Two-Mode Hybridtriebe mit zwei Arten der Leistungsverzweigung [14] [32]

Betriebsmodus	Schaltelemente			
	B4	K2	B3	K4
EVT 1	X			
1.Gang	X			X
2.Gang	X	X		
EVT 2		X		
3.Gang		X		X
4.Gang		X	X	

Tabelle 2-10: Schaltmatrix des Two-Mode-Hybridgetriebes für unterschiedliche Betriebsmodi [32]

Zur Anwendung kommen insgesamt drei Planetensätze und je zwei elektrische Maschinen, Bremsen und Kupplungen. Dies ermöglicht die Nutzung von vier mechanischen Gangstufen und zwei elektrische stufenlose Übersetzungsbereiche. Tabelle 2-10 zeigt die erforderlichen Stellungen der Schaltelemente für den jeweiligen Betriebsmodus. So wird beispielsweise durch das Schließen der Bremse B4 die erste stufenlose Betriebsart ausgewählt. Die vier mechanischen Gangstufen ermöglichen einen parallelen Hybridbetrieb, ähnlich wie bei einem P2-Hybridgetriebe. [14]

Der vordere Bereich des Getriebes ist für das Anfahren sowie das rein elektrische Fahren ausgelegt und der hintere Bereich ist hingegen für höhere Geschwindigkeiten konzipiert. Dieses System bietet somit einen erweiterten Geschwindigkeitsbereich im rein elektrischen Fahrbetrieb und des Weiteren kaum spürbare Schaltvorgänge zwischen den beiden Bereichen mit stufenlosem Betrieb und den vier starren mechanischen Gangstufen. Aufgrund dieser vier mechanischen Gänge ist der Anteil der Leistungsverzweigung, der durch den elektrischen Teil geleitet wird, vergleichsweise gering. Somit kann im Getriebe eine verbesserte Effizienz erreicht werden als mit dem One-Mode-System. [14]

- **Leistungsverzweigung mit zusätzlichem seriellem Hybridmodus**

Das leistungsverzweigte Antriebssystem von Voltec ist mit einem zusätzlichem seriellem Hybridmodus ausgestattet und ist bereits mit seiner 2.Generation am Markt. Der schematische Aufbau der ersten Getriebegeneration ist in Abbildung 2-47 dargestellt und umfasst zwei Elektromaschinen, ein Planetengetriebe zur Leistungsaufteilung, zwei Kupplungen sowie eine Bremse. Das Planetengetriebe bildet die Kernkomponente zur Aufteilung beziehungsweise zum Zusammenführen der Leistungen.

Durch entsprechendes Schalten der Kupplungen und Bremse können verschiedene Betriebsarten realisiert werden. Demnach lassen sich zwei unterschiedliche rein elektrische Betriebsarten, ein serieller Modus zur Reichweitenverlängerung sowie ein kombinierter Fahrmodus umsetzen. Tabelle 2-11 zeigt hierfür die erforderlichen Kupplungsschaltstellungen für den jeweiligen Betriebsmodus. [14]

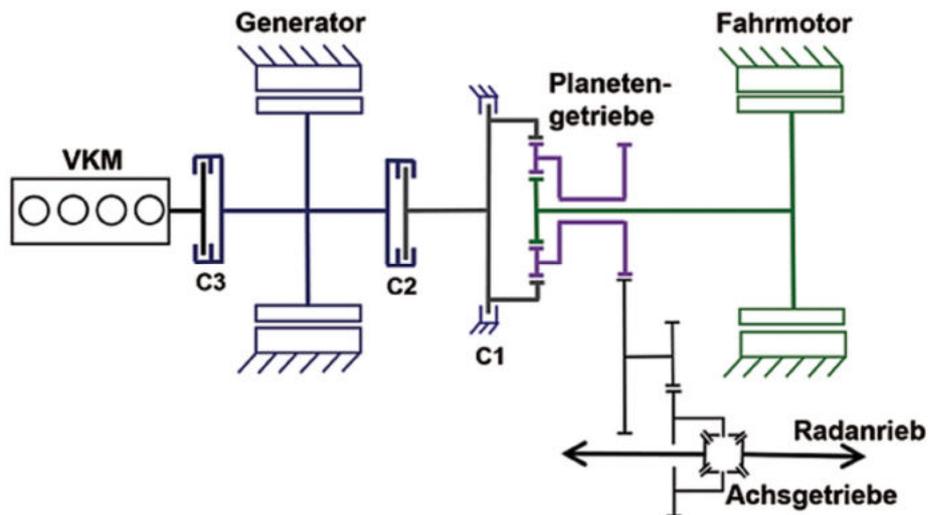


Abbildung 2-47: Schematische Darstellung der leistungsverzweigten Antriebseinheit von Voltec 1. Generation [7]

Betriebsmodus		Schaltelemente		
		Kupplung 1	Kupplung 2	Kupplung 3
Elektrischer Modus 1	Ein-Motor-EV-Betrieb	Geschlossen	Offen	Offen
Elektrischer Modus 2	Zwei-Motor-EV-Betrieb	Offen	Geschlossen	Offen
Reichweitenverlängerungsmodus	Serieller Betrieb	Geschlossen	Offen	Geschlossen
Kombinierter Modus	Leistungsverzweigung auf Ausgangsseite	Offen	Geschlossen	Geschlossen

Tabelle 2-11: Betriebsmodi und Kupplungsschaltstellungen des Voltec-Antriebssystems (1. Generation) [7]

- **Elektrischer Modus 1**

Der Fahrleistungsbedarf wird primär vom elektrischen Fahrmotor gedeckt. Dieser wird über den mitgeführten Energiespeicher mit Strom gespeist.

- **Elektrischer Modus 2**

Die zweite elektrische Maschine (Generator A) wird zur Erweiterung der Leistung und des elektrischen Geschwindigkeitsbereichs eingesetzt. Diese ist vom Verbrennungsmotor entkoppelt und trägt zusätzlich zur Verbesserung der Gesamteffizienz bei.

- **Reichweitenverlängerungsmodus**

Bei minimalen Batterieladestand wird die Verbrennungskraftmaschine automatisch aktiviert und im seriellen Hybridmodus betrieben. Somit treibt der VKM den Generator an, welcher den Strom für den Fahrmotor liefert. In diesem Modus zur Reichweitenverlängerung besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und den Antriebsrädern.

- **Kombinierter Modus**

Eine Leistungsverzweigung auf der Ausgangsseite kann zur Verbesserung des Wirkungsgrades beitragen. In diesem Betriebsmodus ist der Verbrennungsmotor mit dem Generator verbunden und dieser ist wiederum über das Planetengetriebe mit dem elektrischen Fahrmotor gekoppelt. Im Sinne einer konstanten Übersetzung stellt diese Anordnung keine direkte Verbindung der VKM mit den Antriebsrädern dar. So wird ein Teil der mechanischen Leistung über den Generator in Strom umgesetzt und dem Fahrmotor zur Verfügung gestellt. Mit diesem Modus wird ein paralleler Hybridantrieb realisiert und eine Effizienzverbesserung von bis zu 15% gegenüber der seriellen Konfiguration bei konstanter Fahrt auf Schnellstraßen erreicht. [14] [66]

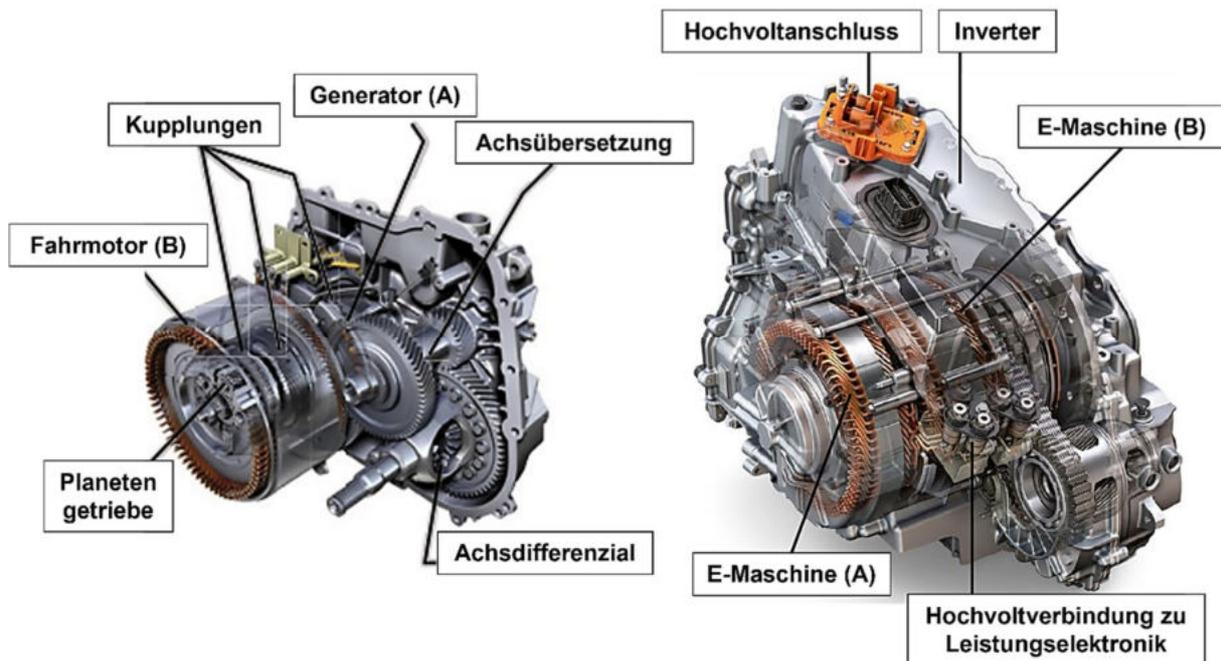


Abbildung 2-48: Das Antriebssystem von Voltec – 1.Generation (links) und 2.Generation (rechts) [66] [67]

Abbildung 2-48 zeigt die beiden leistungsverzweigten Antriebssysteme von Voltec mit zusätzlichem seriellen Hybridmodus sowohl in seiner ersten als auch in seiner zweiten Generation. Der Hauptunterschied der 2.Generation zur 1.Generation besteht im Wesentlichen in der Erhöhung der Leistungsdichte der elektrischen Maschinen sowie einer gesteigerten elektrischen Reichweite. Eine weitere grundlegende Änderung ist die Verwendung eines zweiten Planetengetriebes anstelle von bisher einem. Dadurch können mehr Betriebsarten als bei der ersten Generation realisiert werden. Zu nennen sind dabei das effizientere elektrische Fahren mit einem oder zwei elektrischen Maschinen, zwei stufenlose elektrische Betriebsarten sowie ein serieller Betriebsmodus. Außerdem ist bei dieser Generation eine direkte mechanische Verbindung des Verbrennungsmotors zu den Rädern möglich, wodurch Wandlungsverluste reduziert werden können. [67]

3. Systemfunktionen

3.1 Bordnetz

Die Hauptaufgabe des Bordnetzes besteht darin, alle elektrischen Verbraucher im Gesamtsystem mit Energie zu versorgen und die Sensoren, Steuergeräte sowie Informationssysteme zu verknüpfen. Grundsätzlich stellt das Bordnetz die Gesamtheit von elektrischen Energieerzeugern, Energiespeichern, Energieverteilern, Energiewandlern, Energieverbraucher, Kabeln, Leitungen, Steckverbindungen, Sicherungen und Relais dar. Darüber hinaus ist im Bordnetz ein elektronisches Energiemanagementsystem für die Energieverteilung sowie Koordination der Verbraucher implementiert. Das Bordnetz hat aber auch die Aufgabe alle Signale und Informationen zwischen den Steuergeräten zu übertragen. Da der Informationsaustausch im Fahrzeug aufgrund der hohen Anforderungen im Zuge der Elektrifizierung, Automatisierung sowie der Sicherheitssysteme ständig zunimmt, werden immer mehr elektronische Steuergeräte benötigt. In Abhängigkeit des Elektrifizierungsgrades im Antriebsstrang werden verschiedene Spannungslagen zwischen ca. 3 Volt für Informations- und Steuersignale und bis zu 800 Volt für Fahrzeugantriebe eingesetzt. [32]

Übersicht Bordnetze

Grundsätzlich wird zwischen Niederspannungsbordnetzen und Hochvoltbordnetzen unterschieden, die wiederum auf verschiedenen Spannungslagen aufgeteilt sind.

Niederspannungsbordnetze sind heutzutage typischerweise mit 12-Volt bis maximal 48-Volt ausgeführt. Diese Spannungslagen bieten den Vorteil, dass Stromnetze bis ca. 60-Volt für den Menschen unschädlich sind und daher keine weiteren Isolations- und Absicherungsmaßnahmen wie bei Hochvoltsystemen notwendig sind. Hochvolt-Bordnetze erfordern eine vollständige Isolation aller berührbaren Teile. Aus Sicherheitsgründen erfolgt eine Isolationsüberwachung, um im Fehlerfall das Hochspannungsnetz abzuschalten oder eine entsprechende Warnmeldung auszugeben. Das Hochvoltsystem stellt bei Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen die Antriebsleistung zur Verfügung und wird daher auch als Traktionsbordnetz bezeichnet. Traktionsbordnetze sind meist mit 400-Volt und bei Fahrzeugen hoher Leistungsklasse mit 800-Volt ausgeführt. [14]

Fahrzeuge mit Hochvoltbordnetzen verfügen zusätzlich über ein Niederspannungsbordnetz. Das Niederspannungsbordnetz übernimmt auch eine wichtige Sicherheitsfunktion für das Hochvoltbordnetz. Es wird benötigt, um das Hochvoltsystem nach Sicherheitsüberprüfung in Betrieb zu nehmen und, um das Hochvoltsystem bei Störungen oder Unfällen durch Öffnen der Schütze spannungsfrei zu machen. [14]

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über typische Bordnetzspannungen für den Einsatz in elektrifizierten Antriebssystemen. Ein Mikro-Hybridsystem bildet die erste Stufe der Hybridisierung und wird in der Regel mit einem 12-Volt- oder 48-Volt-Bordnetz ausgeführt, wobei das 48V-System einen erhöhten Funktionsumfang ermöglicht. Mild-Hybridsysteme sind hingegen mit einem etwas höheren Elektrifizierungsgrad ausgelegt, sodass diese mit mehr elektrischer Leistung operieren als Mikro-Hybridsysteme. Das Spannungsniveau wird in der Regel mit 48 Volt ausgeführt, um unterhalb der gefährlichen Berührschutzgrenze von 60 Volt zu bleiben. Mild-Hybrid-Systeme können jedoch auch mit Spannungen von bis zu 150 Volt ausgelegt werden, was jedoch normalerweise nicht üblich ist. [7]

	Mikro-Hybrid	Mild-Hybrid	Voll-Hybrid	Plug-In-Hybrid	vollelektrisch
12-Volt-Bordnetz	x				
48-Volt-Bordnetz	x	x			
150-350-Volt-Bordnetz			x	x	
350-400-Volt-Bordnetz				x	x
720-800-Volt-Bordnetz					x

Tabelle 3-1: Übersicht von typischen Bordnetz-Spannungslagen für elektrifizierte Antriebssysteme [7]

Um die hohen elektrischen Leistungen in Vollhybridfahrzeugen abzudecken, werden die Hochvolt-Bordnetze in der Regel mit einem Spannungsniveau im Bereich zwischen 150-350 Volt ausgelegt. Die 4. Generation des Toyota Prius verwendet beispielsweise eine Spannungslage von etwa 200 Volt. Plug-In-Hybridfahrzeuge sind typischerweise mit einem höheren Elektrifizierungsgrad konzipiert als Vollhybridfahrzeuge. Daher hat dort die Hochvolt-Batterie einen Spannungsbereich zwischen 250-400 Volt. Der Großteil der heute batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge weist eine Hochvolt-Spannungslage zwischen 350-400 Volt auf. [7]

12-Volt- Bordnetz

Das konventionelle Bordnetz heutiger Pkw ist mit einer Spannung von 12-Volt ausgelegt, sodass elektrische Leistungen bis etwa 3 kW ermöglicht werden. Ein vom Verbrennungsmotor angetriebener Generator versorgt dabei das Bordnetz mit elektrischer Energie. Als Energiespeicher kommt in der Regel eine 12-Volt-Bleisäurebatterie zum Einsatz, welche Energie zum Starten zur Verfügung stellt, und Leistungsspitzen ausgleicht. Durch die zunehmende Integration von elektrischen Verbrauchern und Regelsystemen kommt das 12-Volt-Bordnetz zunehmend an seine Grenzen. [7] [14]

Bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-Funktion ist das Bordnetz dem eines konventionellen Fahrzeugs sehr ähnlich und muss nur um zusätzliche Funktionen erweitert werden. Es muss die Startfähigkeit des Verbrennungsmotors unter allen Betriebsbedingungen durch eine Batteriezustandserkennung sichergestellt werden. Während des Motorstopps und Startvorgangs muss der problemlose und sichere Betrieb auch aller anderen Verbraucher gewährleistet sein. Deshalb muss die Versorgungsspannung immer in einem zulässigen Bereich gehalten werden. Um diese zusätzlichen Funktionen des Bordnetzes zu realisieren, ist ein Energiemanagementsystem erforderlich. Informations- und Datenbussysteme, Steuergeräte und Sensoren enthalten viele Komponenten, die für Spannungen von 5 Volt oder weniger ausgelegt sind. Diese Systeme werden aus dem 12V-Bordnetz mittels DC/DC-Wandler mit induzierter Spannung versorgt. [7] [14]

Bei Nutzfahrzeugen kommt ein konventionelles Bordnetz mit einer Spannung von 24-Volt zum Einsatz. Dabei werden zwei 12-Volt-Batterien in Serie geschaltet, um die erhöhten elektrischen Energiebedarfe abzudecken. [7] [14]

48-Volt- Bordnetz

Bei Mikro- und Mild-Hybridisierungen erreicht das 12-Volt-Bordnetz aufgrund des erhöhten elektrischen Leistungsbedarfs schnell seine Grenzen. Zur Bereitstellung der geforderten Leistungen wird ein zweites Bordnetz mit einer höheren Spannung eingeführt. Die Spannungsebene dieses Bordnetzes, das parallel zum 12-Volt-Netz verwendet wird, beträgt 48-Volt und es können stationäre elektrische Leistungen von 12-14 kW realisiert werden.

So können verschiedene Hybridfunktionen wie Boosten oder Segeln problemlos umgesetzt werden. Es kann Bremsenergie besser rekuperiert werden. Es steht mehr Leistung für elektrische Nebenverbraucher, wie beispielsweise Klimakompressor, Heizung, Wasser- und Vakuumpumpe, Fahrdynamikregelsystem oder Turbolader-Verdichter zur Verfügung. [68]

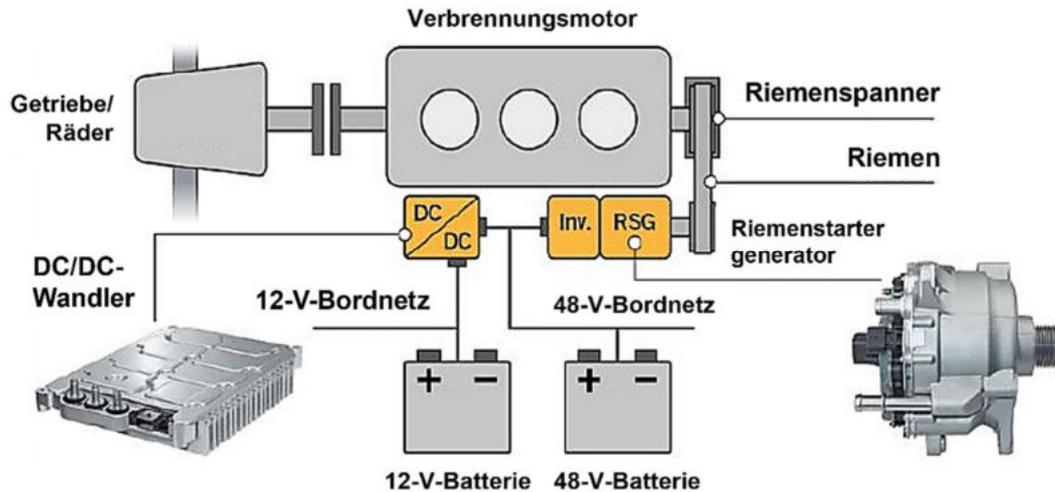


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Zwei-Spannungsbordnetzes mit 12- und 48-Volt [68]

Abbildung 3-1 zeigt eine schematische mögliche Architektur eines Zwei-Spannungsbordnetzes mit 12- und 48-Volt. Die Kombination der beiden Bordnetze erfolgt über einen DC/DC-Wandler. Das 12-Volt-Bordnetz ist nach wie vor für die Versorgung der herkömmlichen Kleinverbraucher wie Steuerungs- und Sicherungssysteme zuständig. Solche Geräte mit 48-Volt zu betreiben, würde zu einem erhöhten Aufwand führen. Aufgrund der erhöhten Leistungen und höherer erforderlichen Batteriekapazitäten werden im 48-Volt-Bordnetz überwiegend Nickel-Metall-Hybrid- oder Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher eingesetzt. [7] [57]

Hochvoltbordnetze

Um die für höhere Hybridisierungsgrade sowie für vollelektrische Fahrzeuge erforderliche elektrische Leistung sinnvoll bereitzustellen, ist der Schritt zu berührgefährlichen Spannungen von mehr als 60 Volt erforderlich. Die Verwendung von gefährlichen Spannungen erfordern die vollständige elektrische Isolation aller angreifbaren Komponenten. Wegen der Gefahr von Isolationsdurchbrüchen und zerstörerischen Lichtbögen sind für alle Hochspannungskomponenten Schutzmaßnahmen erforderlich. [57]

Ein DC/DC Wandler wird zur Umwandlung der Traktionsnetzspannung in 12V-Niederspannung eingesetzt, welches analog wie bei 48V-Traktionsnetzen, die Versorgung der leistungsschwächeren Nebenverbraucher, Sicherheitsfunktionen für das Hochvoltnetz und eine 12V-Bleisäurebatterie umfasst. [57] [69]

Bei leistungsstarken Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen werden auch höhere Bordnetzspannungen von bis zu 800 Volt eingesetzt. Solche Spannungen erlauben geringe Leitungsquerschnitte und kompakte Bauformen der elektrischen Maschinen. Darüber hinaus sind hohe Spannungen eine wichtige Voraussetzung für das Gleichstrom-Schnellladen mit hoher Leistung. Dabei können mittlerweile Ladeleistungen von 170-350 kW realisiert werden und dadurch das Nachladen der Batterie deutlich verkürzt werden. Im Gegensatz zum 400-Volt-System kann bei der 800-Volt-Technologie der Ladestrom bei gleicher Ladeleistung halbiert werden. Dies reduziert die Verlustleistung im Ladesystem,

d.h. bis zur Einleitung in die Batterie, um den Faktor von etwa Vier. In der Batterie ändert die erhöhte Systemspannung die Zellspannung, den Zellstrom und die thermischen Verluste der Einzelzellen allerdings nicht. Unabhängig von der Systemspannung ist zu beachten, dass zu häufiges Schnellladen die Lithium-Ionen-Zellen der Batterie auf Dauer schädigen kann. [14] [69]

Ein Hochvolt-Bordnetz besteht im Wesentlichen aus einem Hochvolt-Batteriesystem, mindestens einer elektrischen Maschine mit dazugehörigem Wechselrichter zur Ansteuerung, einem DC/DC-Wandler, einer Leistungsverteilung mit Energiemanagementsystem, weiteren Hochvolt-Verbrauchern sowie den entsprechenden Hochvolt-Leitungen mit Stecker. [14] [69]

Abbildung 3-2 zeigt die Bordnetzarchitektur des Porsche Taycan. Hierbei handelt es sich um ein batterieelektrisch betriebenes Hochleistungsfahrzeug mit einer Traktionsnetzspannung von 800 Volt. Das Fahrzeug ist sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse mit einer elektrischen Achsantriebseinheit ausgestattet. Die Leistungselektronik muss für die 800 Volt Hochvolt-Komponenten entsprechend modifiziert werden. Eine Besonderheit in diesem System ist, dass zusätzlich auch noch 400 Volt und 48 Volt Verbraucher bedient werden. [70]

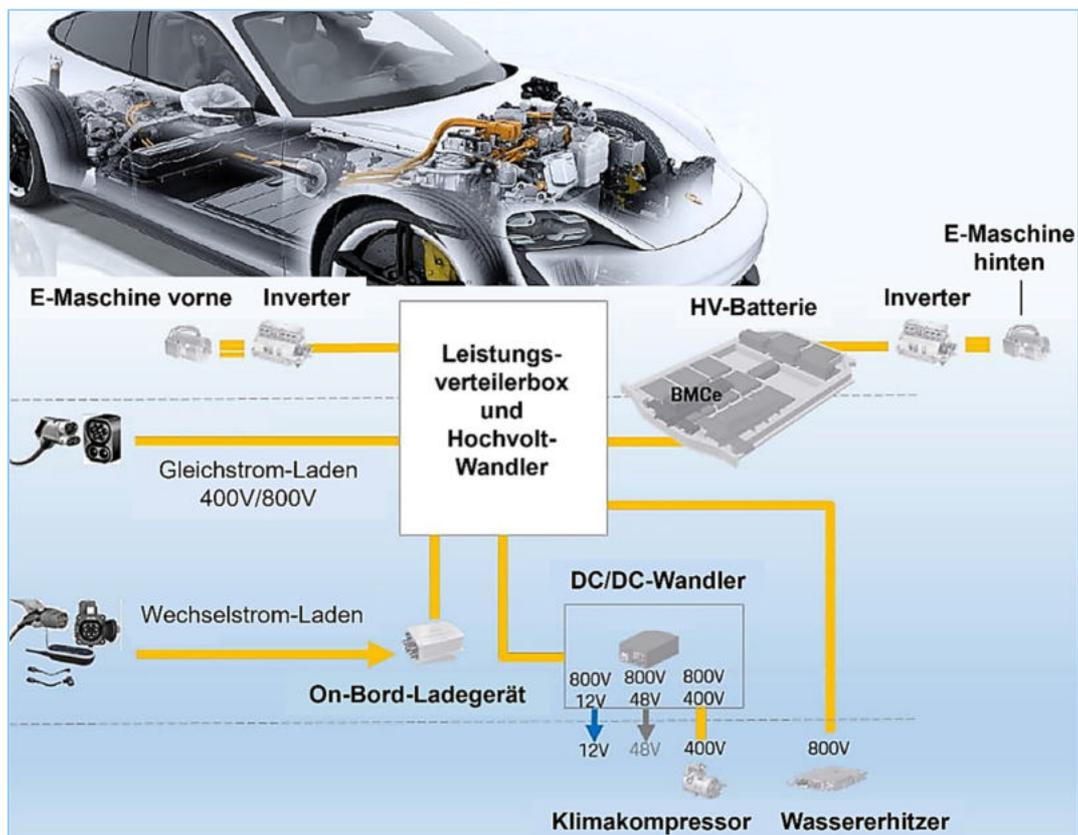


Abbildung 3-2: Bordnetzarchitektur von einem Hochleistungs-Elektrofahrzeug mit 800V-Spannung [70]

Ein kombinierter DC/DC-Wandler, der von der 800-Volt-Batterie gespeist wird, versorgt sowohl das 12-Volt- und 48-Volt-System als auch den mit 400 Volt betriebenen Klimakompressor. Das 48-Volt-Bordnetz wird hauptsächlich für das aktive Fahrwerkssystem benötigt. Um die Verträglichkeit mit der bestehenden Ladeinfrastruktur zu gewährleisten, ist ein Hochspannungswandler in das System integriert. Dadurch kann die Batterie auch bei niedrigen Spannungen geladen werden, indem der Wandler die Spannung auf 800 Volt hochsetzt. [70]

Leistungsverteilung

Zur Steuerung des Stromflusses zu den jeweiligen Verbrauchern ist eine Leistungsverteilereinheit erforderlich. Diese wird häufig auch PDU „Power Distribution Unit“ genannt. So können alle elektrischen Verbraucher je nach Bedarf betrieben sowie ein- und ausgeschaltet werden. Dabei dürfen die Energiespeicher nicht überbelastet werden. Daher ist es je nach Anforderung notwendig, den erforderlichen Leistungsbedarf der verschiedenen Hochvolt-Komponenten möglichst genau abzuschätzen. Hierfür ist das Energiemanagementsystem zuständig. [14]

In Abbildung 3-3 ist der schematische Aufbau einer solchen Verteilereinheit dargestellt. Zusätzlich zur Energieverteilung ist auch die aktive Überwachung sowie Kontrolle der einzelnen Verbraucher eine wesentliche Aufgabe der Verteilereinheit. So ist in der Regel jedes Bauteil separat abgesichert, um im Falle eines Fehlers keine unzulässig hohen Ströme im Verbraucher zu verursachen. Die verteilte Steuerung mit integrierter Diagnosefunktion sowie der daraus resultierende Selbstschutz des Systems ermöglicht eine kompakte Bauweise der Verteilereinheit. Eine typische Ausführung ist die Integration dieser Einheit in Form einer Batterie-Anschlussbox direkt am Hochvolt-Batteriesystem. [14] [71]

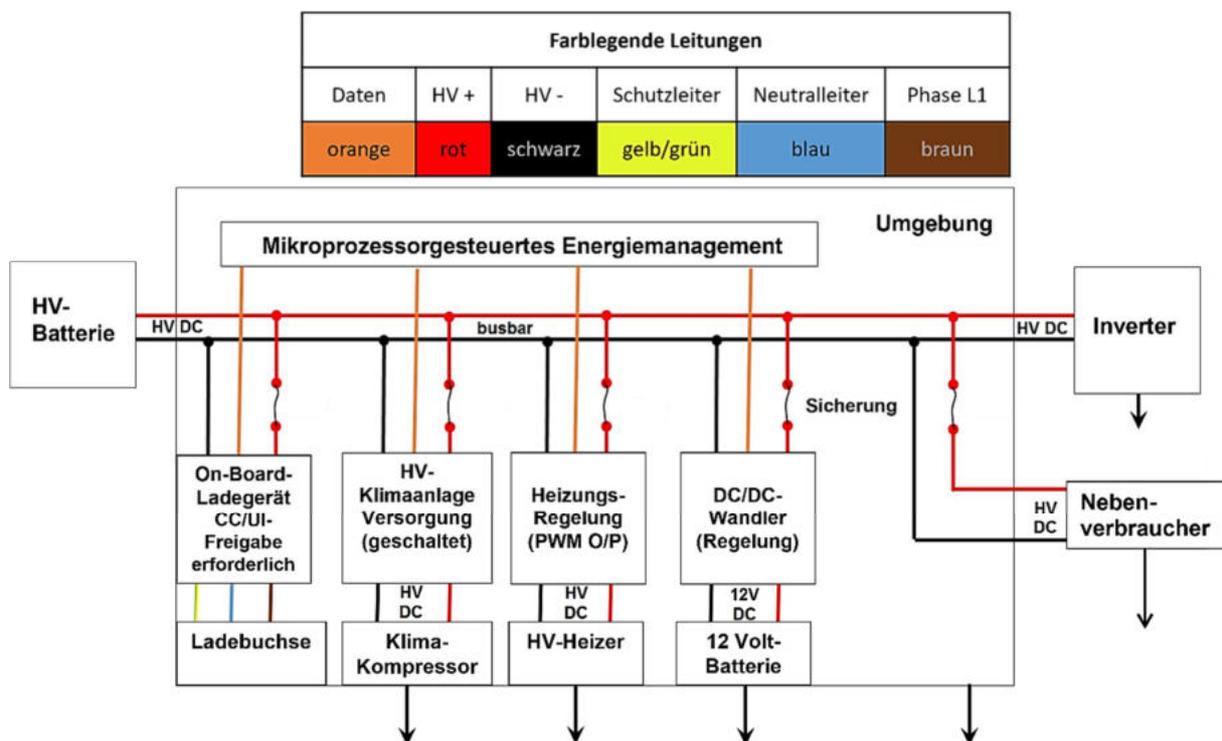


Abbildung 3-3: Beispielausführung einer Leistungsverteiler-Einheit [71]

Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler)

Der DC/DC-Wandler kann als eine Art Ersatz für den mechanisch riemengetriebenen Generator (Lichtmaschine) angesehen werden. In der Regel liegt der Leistungsbereich eines Gleichspannungswandlers zwischen 1,5 und 3 kW. Die 12-Volt-Batterie kann zusätzlich zur Abdeckung von kurzfristig höheren Leistungsspitzen im 12-Volt-Netz verwendet werden. Durch eine bidirektionale Auslegung dieser Komponente kann das Hochvoltbordnetz aber auch von der 12-Volt-Batterie gespeist werden. So haben Hybridfahrzeuge, die den Verbrennungsmotor mit einer elektrischen Maschine starten, die Möglichkeit, bei einer defekten oder entladenen Hochvoltbatterie die VKM zu starten. [32]

Der grundlegende Aufbau eines DC/DC-Wandlers besteht aus einer Schalteinheit, einem Transformator zur Potentialtrennung, einem nachgeschalteten Gleichrichter und einer Filtereinheit. Die Integration der Komponente in das Fahrzeug kann an unterschiedlichen Einbauorten erfolgen. So kann der Wandler in das Gehäuse der Leistungselektronik der elektrischen Maschine integriert werden. In reinen Elektrofahrzeugen wird der DC/DC-Wandler jedoch häufig als separates flüssigkeitsgekühltes Bauteil ausgeführt. Dies ist hauptsächlich auf den erhöhten Kühlungsbedarf der Leistungshalbleiterelemente zurückzuführen. [32]

Hochvoltleitungen

Zur eindeutigen optischen Unterscheidung sind alle Hochspannungsleitungen im Fahrzeug durch eine orangefarbene Signalfarbe des Mantels gekennzeichnet. Hochvolt-Leitungen sind im speziellen Ladeleitungen zur HV-Batterie, Verbindungsleitungen zwischen Batterie, dem Wechselrichter und der E-Maschine, Hochvoltbatteriemodulverbindungen sowie interne Verkabelungen aller HV-Komponenten. [32] [69]

Der Begriff „Leitung“ bezieht sich auf eine flexible Konstruktion aus Drähten, die sich besonders gut für die Bordnetztechnik eignet. Eine steife Konstruktion mit massiven Drähten wird hingegen als „Kabel“ bezeichnet und hauptsächlich für die Festinstallation in der Haustechnik verwendet. Leitungen in der Fahrzeugtechnik werden in der Regel aus gleichmäßig verseilten Litzen oder aus ungleichmäßig zusammengesetzten Drähten hergestellt. Litzen werden wiederum aus Einzeldrähten oder aus Drahtbündeln zusammengesetzt und verseilt. Die Hochvolt-Leitungen müssen hohe Ströme von 50-400 Ampere bei Spannungen von 200-800 Volt übertragen. [57]

Abbildung 3-4 zeigt den prinzipiellen Aufbau von Hochvolt-Leitungen, die in elektrifizierten Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Grundsätzlich wird zwischen einadrigen und mehradrigen geschirmten Leitungsarten unterschieden, die sich aus Leiter, Isolation, Abschirmung und Mantel zusammensetzen.

Das Leitermaterial einer Hochvoltleitung besteht in der Regel aus Kupfer. Die Verwendung von Aluminiumleitern ermöglicht zwar eine Gewichts- und Kostenreduzierung, aber vergrößert jedoch den Leitungsdurchmesser und erfordert eine anspruchsvollere Kontaktierungstechnik. Als Primärisolationsmaterialien werden temperaturbeständige Kunststoffe wie Vernetztes-Polyethylen (XPE) oder Silikon (SI) eingesetzt. Die Schirmung ist aus Gründen der elektromagnetischen Strahlung und der Verträglichkeit zwingend erforderlich und wird in Form eines Schirmgeflechts mit Folie oder eines Metallrohres um den Leiter mit Isolierung angebracht. [69] [73]

Die Abschirmung dient als zusätzlicher Schutzkontakt. Dieser ist beidseitig kontaktiert und mit dem Massenpotential verbunden. So kann die Isolation zwischen der HV-Plus- und HV-Minusleitung gegenüber der Abschirmung dauerhaft überwacht werden und die Hochvoltbatterie bei Überschreitung eines Fehlerstrom-Grenzwertes sofort vom Bordnetz getrennt werden. Darüber hinaus ist das HV-Minuspotential von der Karosseriemasse getrennt, wodurch sich Sicherheit weiter erhöht. Somit stellt der versehentliche gleichzeitige Kontakt des positiven HV-Potentials mit der Karosserie keine Gefahr dar. Die Umhüllung der Hochvoltleitung besteht aus einem temperaturbeständigen Kunststoff-Außenmantel. [69] [73]

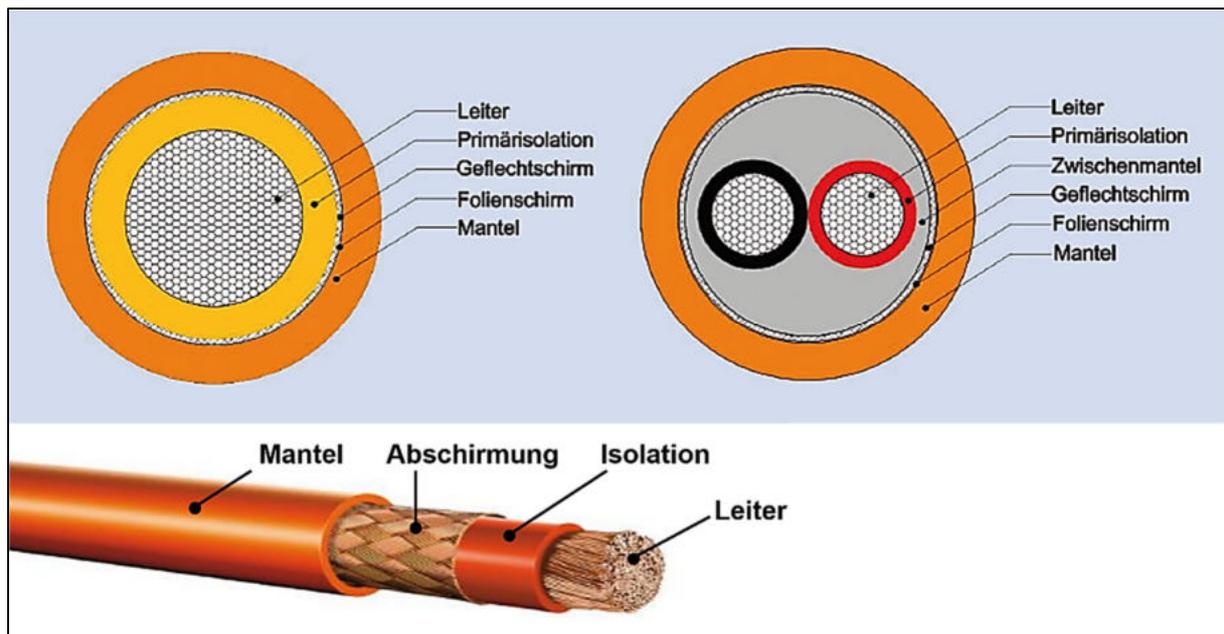


Abbildung 3-4: Schematischer Aufbau einadrig und mehradrig geschirmter Hochvoltleitungen [69] [73]

Für den zweiphasigen Anschluss der HV-Batterie über den Leistungsverteiler an den Wechselrichter und von dort ausgehend den dreiphasigen Anschluss der elektrischen Maschine werden vor allem einadrig geschirmte HV-Leitungen verwendet. Die verwendeten Leitungsquerschnitte betragen normalerweise zwischen 16-70 Quadratmillimeter. Die Nebenaggregate, wie Klimakompressor, elektrischer Heizer, On-Board-Ladegerät haben dagegen eine deutlich geringere Leistung, sodass hier häufig mehradrig geschirmte Leitungen mit Querschnitten von 2,5 bis 6 Quadratmillimeter verwendet werden. [69] [73]

Die Hauptkriterien für die Auslegung der zu verwendenden Hochvolt-Leitungen sind das Spannungsniveau, die Stromerwärmung sowie die Umgebungstemperatur. Ein wesentliches Kriterium ist die Beanspruchung der Hochvolt-Leitungen mit dauerhaft hohen Stromstärken, wodurch eine Eigenerwärmung der Leitung und Verbindungskomponenten resultiert. Diese Erwärmung kann in Kombination mit einer hohen Umgebungstemperatur, wie z. B. bei Hybridfahrzeugen im Motorraum oder bei der Verlegung entlang der Abgasanlage, schnell zu unzulässig hohen Temperaturen in den Hochvolt-Leitungen und deren Isolierung führen. [69] [72]

Hochvolt-Steckverbindungen

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Übertragung elektrischer Leistungen werden auch neue Hochvolt-Steckverbindungen benötigt. Unter Berücksichtigung zahlreicher Anforderungen existiert eine Standardisierung der Hochvolt-Steckverbinder und deren Einsatz an verschiedenen Hochvolt-Komponenten im Fahrzeug. Die Standardisierung der Verbindung zwischen Hochspannungsleitung und Steckverbinder ist besonders wichtig, um unterschiedliche Temperatur-Leitungsklassen oder Leitermaterialien in einem Stecksystem ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen verwenden zu können. [39]

Die HV-Steckersysteme und geschraubte Terminals werden dabei in Abhängigkeit vom Dauerstrom sowie von der Leitungs-Querschnittfläche in insgesamt fünf unterschiedliche Klassen eingeteilt: [39]

- Klasse 1: Querschnitte von 2,5 bis 4mm² und 25 Ampere Dauerstrom
- Klasse 2: Querschnitte von 4 bis 6mm² und 40 Ampere Dauerstrom
- Klasse 3: Querschnitte von 6 bis 16mm² und 80 Ampere Dauerstrom
- Klasse 4: Querschnitte von 16 bis 50mm² und 200 Ampere Dauerstrom
- Klasse 5: Querschnitte von 70 bis 120mm² und 400 Ampere Dauerstrom

Die Steckverbinder müssen eine Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung aufweisen und im gesteckten Zustand staub- und wasserdicht sein. In Abbildung 3-5 sind verschiedene Hochvolt-Steckverbinder dargestellt. Je nach Einsatzgebiet werden zwei- oder dreiphasige HV-Steckverbinder in 90 oder 180 Grad Abgangsrichtung der Leitung verwendet.



Abbildung 3-5: HV-Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung (links), verschiedene HV-Steckverbinder (Mitte) und Dreiphasenstecker für Wechselstromladen (rechts) [39] [72]

Die Hochvolt-Steckverbinder sind im nicht angesteckten Zustand berührungsschutz nach IP2XB (VDE-Finger) ausgeführt. Um diesen Schutz sowohl im Steckverbinder als auch in der Stiftleiste auf der gegenüberliegenden Seite zu gewährleisten, sind zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen notwendig, siehe Abbildung 3-6 (links). Die Verwendung eines Rundkontaktes mit Fingerschutzkappe ist der sicherste Weg, um eine Berührung der stromführenden Kontakte ab einem Leitungsquerschnitt von ca. 25 mm² zu verhindern. [72]



Abbildung 3-6: Finger-Berührungsschutz (links) und HV-Steckverbinder mit Signalkontaktanschluss (rechts) [39] [69]

Eine wesentliche Sicherheitsfunktion ist die Unterbrechungserkennung am aktiven Hochvolt-System durch Abziehen eines Steckverbinders oder Öffnen einer Gehäuseabdeckung einer HV-Komponente. Durch voreilende Signalkontakte, auch HV-Interlock (HVIL) genannt, wird der ordnungsgemäße Anschluss von Steckverbindungen im Hochspannungskreis überwacht. Dies verhindert elektrische Gefährdungen durch ungewolltes, nicht fachgerechtes oder sonstiges Trennen einer Hochvolt-Steckverbindung bei aktiviertem Hochvoltsystem. Dazu sind in allen relevanten Steckverbindungen Sicherheitskontakte vorhanden, siehe Abbildung 3-6 (rechts). Diese Kontakte sowie das dazugehörige

Steuergerät, werden in einem separaten Stromkreis vom 12-Volt-Bordnetz versorgt. Das Abziehen einer der HV-Steckverbindungen und die damit verbundene Unterbrechung des Stromkreises der Sicherheitskontakte wird von der Auswerteelektronik registriert und öffnet die Hauptschütze der HV-Batterie, um das HV-System umgehend spannungsfrei zu schalten. Wenn Gleichspannung an den Leistungskontakten anliegt, kann sonst beim Lösen der Kontakte ein Lichtbogen entstehen, der die Leistungskontakte zerstört und die Person, die das Gerät bedient, gefährdet. [39] [69]

Für den Servicebetrieb an Fahrzeugen mit Hochvoltsystem steht ein separater Wartungsstecker (Service-Trennschalter) zur Verfügung. Dieser ist oft im Kofferraumbereich verbaut, kann aber je nach Hersteller an unterschiedlichen Einbauorten zu finden sein. Bei Servicearbeiten am Fahrzeug wird dieser Trennschalter gezogen, um das Hochvoltsystem durch Öffnen der Hauptschütze spannungsfrei zu schalten. Nach erfolgter Freischaltung des Fahrzeugs muss dieser Stecker durch ein Vorhängeschloss gesichert werden, damit das ausgeschaltete HV-System nicht versehentlich von anderen Personen wieder aktiviert werden kann. Während der gesamten Dauer der Service- oder Reparaturtätigkeiten muss durch Warnschilder auf diesen Zustand hingewiesen werden. Abbildung 3-7 zeigt einen solchen gesicherten Service-Trennschalter-Stecker mit Vorhängeschloss sowie ein mögliches Warnschild. [39] [69]

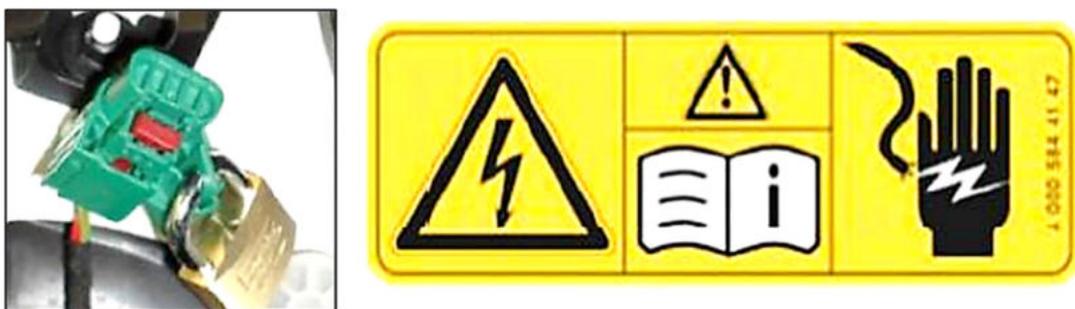


Abbildung 3-7: Service-Trennschalter mit Vorhängeschloss (links) und Warnschild (rechts) [69]

Hauptschütze und Relais

Schütze und Relais sind sicherheitstechnische Verschleißteile, die auf Lebensdauer des Fahrzeugs ausgelegt sind. Wenn ein defekter Hauptschütz, z.B. durch Verschweißen der Kontakte, nicht ordnungsgemäß öffnet, stellt das eine hohe Gefährdung für Insassen, bei Wartungsarbeiten, und im Falle eines Unfalls auch für Einsatzkräfte dar. Vor Start des Fahrzeugs muss die Hochvoltbatterie erst mit dem Bordnetz verbunden oder im Störfall sowie bei Service- oder Reparaturtätigkeiten von diesem wieder getrennt werden. Diese Funktion wird in der Regel von zwei Hauptschützen (Kontakten) ausgeführt, mit denen sowohl die Plus- als auch die Minusleitung der Hochvoltbatterie zu- oder abschaltet wird. Um die geltenden Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, werden die beiden Pfade getrennt geschaltet. [39]

In Abbildung 3-8 ist eine schematische Darstellung eines Hochvolt-Bordnetzes mit der Anordnung der Hauptschütze und des dazu erforderlichen Vorladerelais mit Widerstand ersichtlich. Ein elektromechanisches Schaltelement im Hochstrombereich wird als Schütz bezeichnet. Im Nieder- und Mittelstrombereich werden diese hingegen Relais genannt. Dabei wird der Hochspannungskreis mit Inverter und zahlreichen Kapazitäten und Induktivitäten langsam mit Spannung „befüllt“.

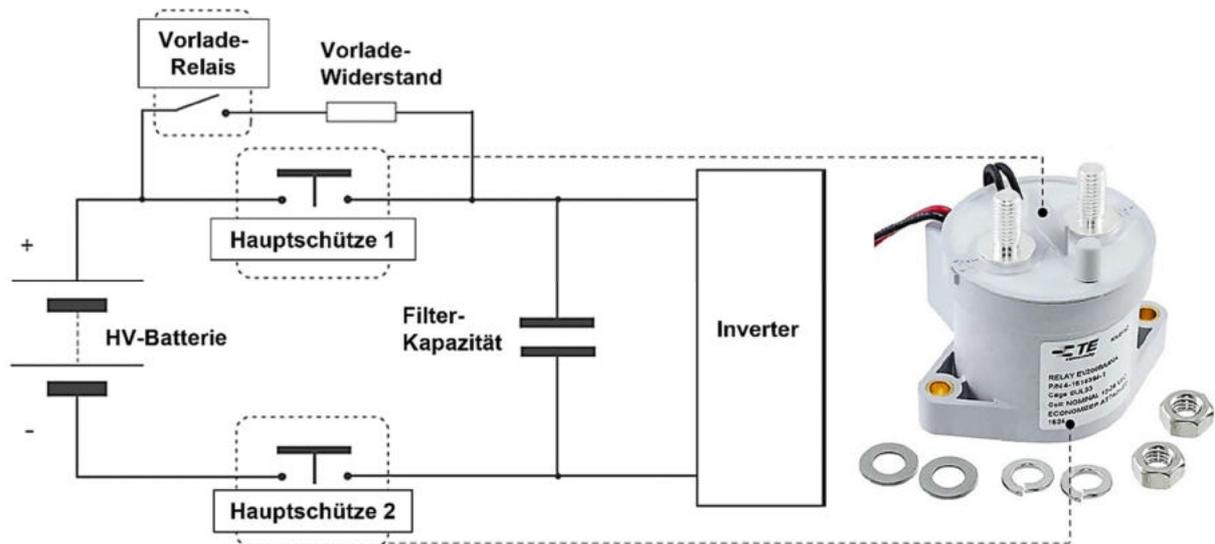


Abbildung 3-8: Schematisches HV-Bordnetz mit Anordnung der Hauptschütze und Vorladerelais [39] [69]

Um die hohen Stromspitzen während des Einschaltvorgangs zu reduzieren, werden Vorladerelais eingesetzt. Dadurch wird eine zu starke Belastung der Schaltkontakte der Hauptschütze vermieden, die sonst durch kurzfristig hohe Ströme und Lichtbögen zum Verschweißen der Kontakte führen könnte. Im Falle eines Kurzschlusses innerhalb der Hochvoltbatterie müssen die Schütze auch in der Lage sein, die hohen Gleichströme zuverlässig zu unterbrechen. [39] [69]

Um ein sicheres Trennen bei hohen Kurzschlussströmen ohne Verschweißen der Kontakte zu erreichen, müssen die elektromechanischen Schaltelemente in den Schützen in einer Umgebung untergebracht werden, in der die Abrisslichtbögen auf ein Minimum begrenzt sind. In der Regel werden hierfür Schütze mit einer speziellen Gasfüllung verwendet, die bis zu 500 Ampere Dauerstrom und bis zu 900 Volt Gleichspannung ausgelegt sind. Die Hauptschütze der HV-Batterie stellen somit das wichtigste automatische Abschaltelement dar und sind damit ein zentraler Bestandteil jedes Hochvolt-Sicherheitskonzeptes. [39] [69]

Die Abschaltung der Hochspannung im Bordnetz und damit die Öffnung der Hauptschütze erfolgt auch beim Auslösen eines Airbags im Falle eines Unfalls. Dabei wird durch eine pyrotechnische Batterieklemme ein Teil des 12-Volt-Bordnetz abgesprengt. Bei schweren Verkehrsunfällen müssen den Rettungskräften Informationen darüber zur Verfügung gestellt werden, an welchen Punkten das Hochspannungsnetz abgetrennt werden kann, ohne sich zu verletzen. Solche Nottrennstellen sind in der Regel mit einem speziellen Hinweisschild gekennzeichnet, sodass die Feuerwehr diese mit einem dafür geeigneten Werkzeug trennen kann. [39] [69]

In elektrischen Antriebssystemen werden Hochvoltrelais und -schütze noch für zahlreiche weitere Anwendungen eingesetzt. Bei Fahrzeugen, die über einen externen Ladeanschluss verfügen, wird dieser Anschluss typischerweise durch Hochvoltschütze zu- oder abgeschaltet. Darüber hinaus werden die zahlreichen Nebenaggregate im Hochvolt-Bordnetz, wie beispielsweise die elektrische Heizung oder der Klimakompressor, über Hochvoltrelais geschaltet. [39] [69]

Bordnetzsicherheit

In herkömmlichen 12-Volt-Bordnetzen stellt der direkte Kontakt mit spannungsführenden Bauteilen, keine unmittelbare Gefahr für den Menschen dar. Daher ist gemäß ISO 6469-3 kein Schutz gegen direktes Berühren erforderlich. [39] [69]

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Falle eines Kurzschlusses zwischen einem 12-Volt-System und der Fahrzeugmasse sehr hohe Leistungen im Störungspfad auftreten können. Dies kann zu unzulässigen Überlastungen des Kabelbaums sowie von 12-V-Komponenten selbst führen, was im Extremfall zu einem Fahrzeugbrand führen kann. Um solche Fehlerfälle sicher zu vermeiden, werden Schmelz- oder Halbleitersicherungen eingesetzt. [39] [69]

Eine Schmelzsicherung ist ein Schutzelement, das bei unzulässig hohem Strom den Leiterdraht der Sicherung zum Schmelzen bringt und somit den Stromkreis unterbricht. Dies kann eine Überhitzung der Bauteile und in weiterer Folge einen Fahrzeugbrand verhindern. Bei Halbleitersicherungen hingegen wird die Aufgabe des schmelzenden Leiterdrahtes durch einen Leistungshalbleiter (z.B. MOSFET) ausgeführt. Dafür ist eine Auswertelektronik erforderlich, die den Strom, der durch den Halbleiter fließt, kontinuierlich überwacht. Bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes unterbricht der Leistungshalbleiter sofort den Stromfluss, sodass der Fehlerpfad in kürzester Zeit spannungsfrei geschaltet wird. Halbleitersicherungen weisen aufgrund der digitalen Schaltungsmöglichkeit (leiten oder sperren) und der höheren Abschaltgeschwindigkeit deutliche Vorteile gegenüber Schmelzsicherungen auf. [39] [69]

In Hochvolt-Bordnetzen gelten deutlich strengere Sicherheitsanforderungen. Zur Gewährleistung für die Sicherheit des Hochvolt-Bordnetzes müssen zahlreiche Normen eingehalten werden. Grundsätzlich gilt, dass ein einfacher Fehler unter keinen Umständen Personen gefährden darf. So muss das Traktionsbordnetz sowie der Gleichspannungswandler zur Versorgung des 12-Volt-Bordnetzes potentialgetrennt (galvanisch getrennt) von der Fahrzeugmasse und dem Niedervoltbordnetz ausgeführt werden. Dies ist erforderlich, da sonst im Falle eines Fehlers gefährliche Spannungen an der Fahrzeugmasse auftreten können. [39] [69]

Weitere Sicherheitsmaßnahmen sind doppelte oder verstärkte Isolation der Leitungen mit Isolationsüberwachung, welche den Isolationswiderstand zwischen positiver- und negativer-Hochvoltleitung und der Fahrzeugmasse ermittelt. Unterschreitet dieser Widerstand einen Mindestwert so wird eine entsprechende Warnmeldung ausgegeben oder das HV-Bordnetz wird abgeschaltet. Alle Hochvoltleitungen im Fahrzeug sind mit einem orangenen Außenmantel versehen und alle Gehäuse von Bauteilen, die mit gefährlicher Spannung betrieben werden, sind mit Warnhinweisen gekennzeichnet. [39] [69]

Eine weitere sehr wichtige Sicherheitsfunktion ist die Unterbrechungserkennung am aktiven Hochvolt-System durch Abziehen eines Steckverbinders oder durch Öffnung einer Gehäuseabdeckung einer HV-Komponente. Diese Überwachung wird auch als Pilotlinienüberwachung bezeichnet und ist eine vom Hochvoltbordnetz galvanisch getrennte leitende Verbindung, die parallel zu den HV-Leitungen verläuft und vom 12-Volt-Bordnetz sowohl versorgt als auch überwacht wird. Wird eine HV-Steckverbindung gelöst oder eine Abdeckung eines HV-Bauteils geöffnet, so wird diese Pilotlinie unterbrochen, wodurch das Hochvoltbordnetz deaktiviert wird. [39] [69]

Die Hauptschütze sind für das Verbinden oder Trennen der Hochvoltbatterie vom restlichen Bordnetz zuständig. Die Hauptschütze werden geöffnet, wenn das Fahrzeug ausgeschaltet wird, ein elektronischer Fehler auftritt oder ein Unfall eintritt. Dabei werden alle im Hochvoltsystem vorhandenen Kapazitäten in wenigen Sekunden auf eine für den Menschen unschädliche Spannung entladen. Dadurch wird die gefährliche Spannung im Gesamtsystem auf die Hochvoltbatterie begrenzt. Die Abschaltung kann von verschiedenen Systemen ausgelöst werden. Dies kann durch manuelle Betätigung des Abstellschalters, des Zündschlüssels, durch manuelles Ziehen des Service-Trennschalters, durch Erkennung eines Unfalls über die Crashsensoren, das Batteriemanagementsystem oder durch das Isolations- oder Pilotlinienüberwachungssystem ausgelöst werden. Alle dafür notwendigen Steuergeräte sowie die Hauptschütze werden über 12-Volt-Bordnetz versorgt. Ist das 12-V-Bordnetz nicht funktionsfähig, so lässt sich auch das Hochvolt-Bordnetz nicht aktivieren. [39] [69]

Steuergeräte und Kommunikation

Durch die höhere Komplexität von elektrifizierten Antriebssystemen steigen auch die Anforderungen an die Integration und Vernetzung von Steuergeräten und die Kommunikation über Bussysteme erheblich.

Es wird grundsätzlich zwischen funktionsorientierter oder zonenorientierter Steuergeräte-Interaktion unterschieden. Bei der funktionsorientierten Interaktion sind die jeweiligen Steuergeräte unterschiedlichen Funktionsbereichen, wie beispielsweise dem Antriebssystem im Fahrzeug zugeordnet. Die Steuergeräte sind jedoch nur innerhalb des jeweiligen Funktionsbereichs miteinander vernetzt und werden in der Regel von einem übergeordneten Domänenleiterschreiber überwacht. Bei einer zonenorientierten Interaktion übernehmen universelle Steuergeräte verschiedene funktionale Aufgaben innerhalb eines definierten Bereichs im Fahrzeug, wie z.B. die Fahrgastkabine. Obwohl sich die Aufgaben der zahlreichen Steuergeräte in einem Fahrzeug teilweise stark voneinander unterscheiden, ist die Grundstruktur sehr ähnlich. [57]

Abbildung 3-9 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Steuergerätes. Die Hauptaufgabe besteht darin, Messdaten oder von einem anderen Steuergerät übermittelte Daten zu verarbeiten und anschließend mechanische oder elektrische Systeme entsprechend der Betriebsituation anzusteuern.

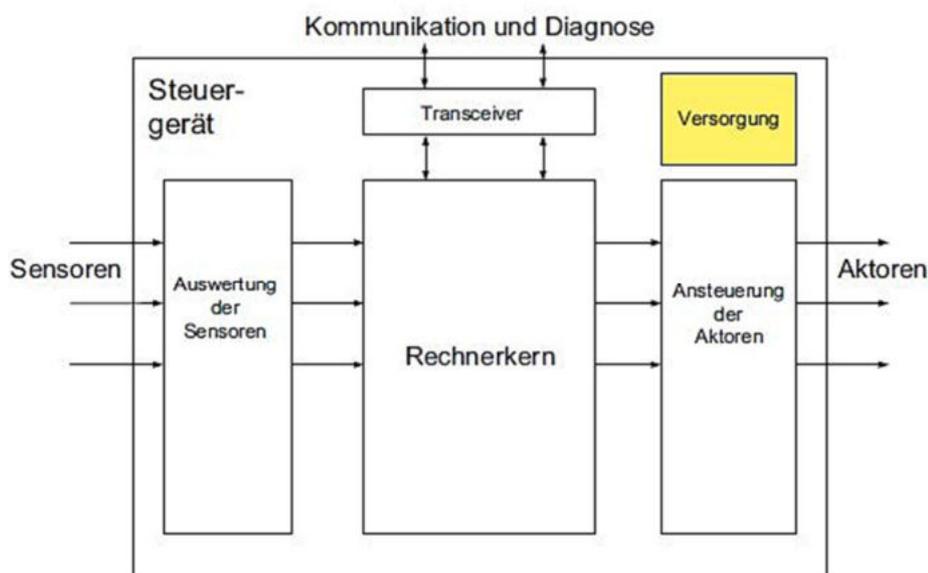


Abbildung 3-9: Grundsätzlicher Aufbau eines Steuergerätes [57]

Der Rechenkern eines Steuergerätes besteht in der Regel aus dem Mikroprozessor, Spannungsversorgung mit Taktgenerator, der Überwachungseinheit und dem Speicher. Für den Datenaustausch mit anderen Steuergeräten sowie mit externen Geräten ist eine Kommunikationsschnittstelle integriert. [57]

Bei Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen stoßen herkömmliche CAN-Bussysteme mit Datenübertragungsraten von bis zu 1 Mbit/Sekunde an ihre Grenzen. Daher werden in elektrifizierten Antriebssystemen vorwiegend FlexRay-, CAN-FD- oder CAN-XL-Bussysteme mit einer Datenübertragungsrate von bis zu 10 Mbit/Sekunde, MOST-Bussysteme mit bis zu 150 Mbit/Sekunde oder Ethernet mit einer Übertragungsrate im Bereich von 10 Gbit/Sekunde oder mehr eingesetzt. Die erforderliche Datenrate ist dabei vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Als Netztopologien werden bevorzugt Ring- oder Sterntopologien sowie Kombinationen davon eingesetzt. [7] [14] [57]

3.2 Thermomanagement

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs stellt auch neue Anforderungen an das Thermomanagementsystem der Fahrzeuge. Im Gegensatz zur konventionellen Antriebsquelle mit VKM, wo typischerweise eine Betriebstemperatur von ca. 90°C vorherrscht, müssen bei elektrifizierten Antriebssystemen unterschiedliche Temperaturbereiche eingehalten werden.

Übersicht Thermomanagement

Tabelle 3-2 zeigt die Hauptkomponenten im Thermomanagementsystem mit ihren optimalen und maximalen Temperaturbereichen des Kühlmittels. Diese Bauteile werden in der Regel so in die Kühlkreisläufe eingebunden, dass zum einen die jeweilige Betriebstemperatur schnell erreicht und zum anderen die zulässige Maximaltemperatur nicht überschritten wird. In allen Betriebszuständen ist der jeweilige optimale Kühlmitteldurchfluss in den Kühlkreisläufen zu gewährleisten.

	Betriebstemperatur	max. Temperaturbereich	Anforderung
VKM (bei Hybridantrieben)	90 °C	> 90 °C	Kühlen
Elektrische Maschine	75-90 °C	125-140 °C	Kühlen
Leistungselektronik	60 °C	60-80 °C	Kühlen
On-Board-Ladegerät	60 °C	60-80 °C	Kühlen
DC/DC-Spannungswandler	60 °C	60-80 °C	Kühlen
Batteriesystem	25 -35 °C	55-60 °C	Heizen und Kühlen
Fahrgastkabine	10-30 °C	> 90 °C	Heizen und Kühlen

Tabelle 3-2: Anforderungen und Temperaturbereiche der Komponenten in einem Thermomanagementsystem [52]

So kann beispielsweise das Hochvolt-Batteriesystem nur in einem Bereich zwischen 25-35°C optimal betrieben werden und muss je nach Umgebungstemperatur und Betriebszustand beheizt oder gekühlt werden. Das Batterie-Kühlsystem ist meist an die Fahrzeugklimatisierung angebunden. Dadurch kann die Batterie auch bei Außentemperaturen über 35°C noch gekühlt werden, was mit einem konventionellen Umgebungsluftwärmetauscher nicht mehr möglich wäre. Man spricht daher von einer aktiven Kühlung. Aufgrund der unterschiedlichen Zellchemie sowie Zellaufbau der Lithium-Ionen-

Batterien muss das Thermomanagementsystem an die individuellen Anforderungen der Batterieausführung angepasst werden. Darüber hinaus ergeben sich aus den verschiedenen Elektrifizierungsgraden, die vom Mild-Hybrid bis zum reinen Elektrofahrzeug reichen, auch grundlegend unterschiedliche Anforderungen an das Thermomanagement des Batteriesystems. [14] [39]

Elektrische Maschinen mit Leistungselektronik, DC/DC-Spannungswandler sowie das On-Board-Ladegerät werden ebenso überwacht und gekühlt. Diese Bauteile werden in der Regel so in die Kühlkreisläufe integriert, dass einerseits die jeweilige Betriebstemperatur schnell erreicht und andererseits die zulässige Maximaltemperatur nicht überschritten wird. [7]

Das direkte Schnellladen des Batteriesystems in Elektro- und Plug-In-Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen mit Gleichstrom führt zu relativ hohen Verlustleistungen und bedeutet unter anderem die höchste Herausforderung für das Kühlsystem der Batterie. Daher wird der direkte Ladevorgang mit Gleichstrom vom Batteriemanagementsystem aktiv überwacht und die Kühlungsanforderungen an das Thermomanagementsystem übermittelt. Die zeitliche Regelung der Ladeströme und Spannungen hängt ganz wesentlich von der Temperatur in der Batterie und der Kühlleistung ab. [14] [39]

Bei rein elektrischen Antriebssystemen ohne Verbrennungsmotor steht keine ausreichende Wärmequelle mehr zum Heizen zur Verfügung, sodass entweder eine rein elektrische Heizung oder eine Heizung mittels Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung erforderlich ist. Die Kühlung des Fahrzeuginnenraums erfolgt über einen elektrisch betriebenen Kältekreislauf. So ist es aber möglich, den Innenraum des Fahrzeugs und ausgewählte Komponenten bei Bedarf zu kühlen oder zu beheizen, wenn das Fahrzeug geparkt ist. [14] [39]

Abbildung 3-10 zeigt ein ausgeführtes Thermomanagementsystem an einem batterieelektrisch betriebenen Fahrzeug mit elektrischer Vorder- und Hinterachse. Das dargestellte Kühlsystem setzt sich aus insgesamt drei Kühlkreisläufen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus zusammen.

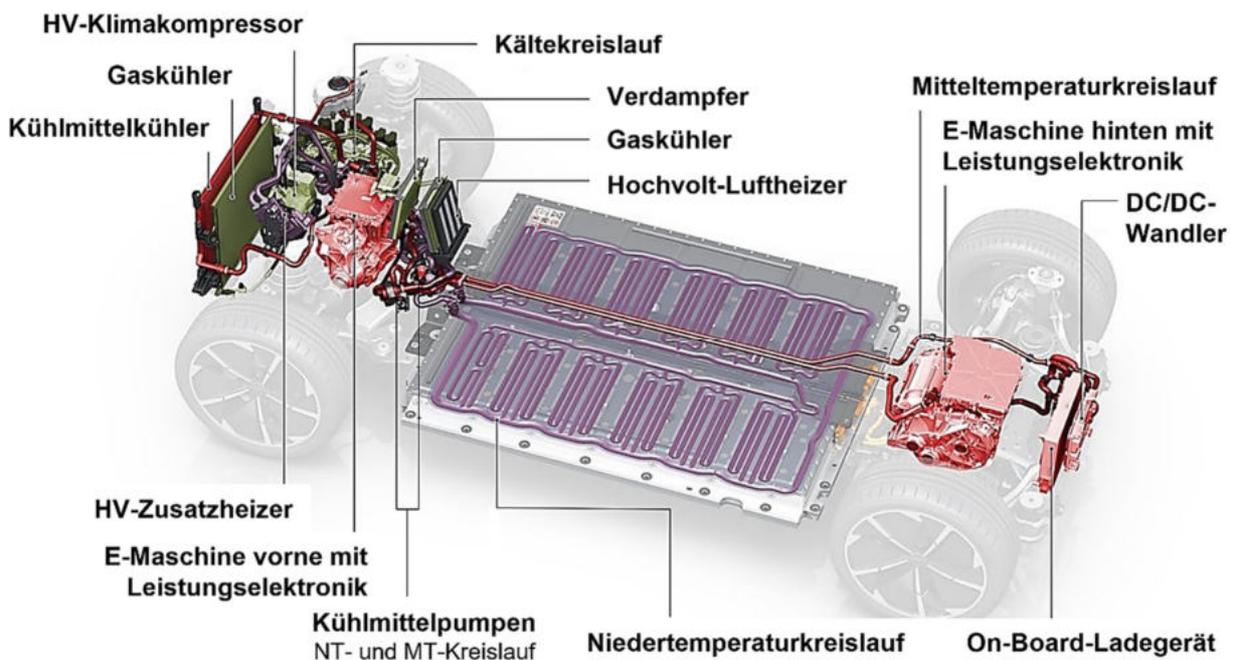


Abbildung 3-10: Ausführungsbeispiel von einem Thermomanagementsystems des Audi Q4 50 e-tron quattro [74]

Der Niedertemperaturkreislauf (ca. 30°C Betriebstemperatur) des Batteriesystems ist über einen speziellen Wärmetauscher (Chiller) mit dem Kältekreislauf (im Temperaturminusbereich) der Klimaanlage gekoppelt, sodass die Temperatur im Niedertemperaturkreislauf nach Bedarf abgesenkt werden kann. Im Mitteltemperaturkreislauf (55-60°C) sind die beiden E-Maschinen mit Leistungselektronik, der DC/DC-Spannungswandler und das On-Board-Ladegerät integriert. Kühlmittelpumpen werden für den Transport des Kühlmittels im Nieder- und Mitteltemperaturkreislauf eingesetzt. Mithilfe von Ventilen können diese drei Teilkühlkreisläufe flexibel verknüpft oder entkoppelt werden, um die Wärmeübertragung zwischen den Komponenten zu regeln. Die von der Kühlflüssigkeit oder vom Kühlmittel aufgenommene Wärme wird über einen Gas- oder Kühlmittelkühler an die Umgebung abgegeben. [7] [39]

Beheizung und Klimatisierung der Fahrgastkabine

Aufgrund des erhöhten Spannungsniveaus bei Elektro- und Hybridfahrzeug-Bordnetzen bieten sich elektrische Luftheizer nach dem PTC-Prinzip (Positiver-Temperatur-Koeffizient) an. Eine effizientere Heizmethode, welche vorwiegend in vollelektrischen- und Plug-In-Hybridfahrzeugen eingesetzt wird, ist ein Wärmepumpensystem in Kombination mit elektrischen Luftheizern. Ein solches System kann in Fahrzeugen mit einem Hochvolt-Klimakompressor leicht realisiert werden. Dabei funktioniert das Wärmepumpensystem ähnlich wie ein herkömmlicher Klimakreislauf, wobei das Kältemittel den Kältekreislauf in umgekehrter Richtung durchströmt. Der Kondensator (Verflüssiger) wird hier als Verdampfer eingesetzt, welcher der Umgebungsluft Wärme entnimmt und an den Luftstrom der Heizung übergibt. Ein Wärmepumpensystem ermöglicht eine bessere Energienutzung als die direkte Umwandlung von Strom in Wärme und trägt damit zur Verlängerung der Reichweite bei. [15]

Bei niedrigen Außentemperaturen kann der Heizleistungsbedarf des Innenraums nicht mehr allein durch die Wärmepumpe gedeckt werden. Deshalb wird noch ein elektrischer Hochvolt-Zusatzheizer verwendet, um die Heizfunktion unter allen Umgebungsbedingungen sicherzustellen. [7] [39]

Bei der Micro- und teilweise auch bei der Mild-Hybridisierung kann der benötigte Leistungsbedarf für einen elektrischen Klimakompressor in den Phasen, in denen der VKM abgestellt ist, nicht für die Klimatisierung bereitgestellt werden. Um dennoch in den Abstellphasen des Verbrennungsmotors die Klimatisierung zu gewährleisten, werden in der Regel Kältespeicher eingesetzt. [7] [39]

Anforderungen an das Kühlsystem

Da typischerweise die Halbleiterelemente die maximal zulässige Kühlmitteltemperatur des Mitteltemperaturkühlkreislaufs vorgeben, erfolgt der Kühlmittelzufluss zu den elektrischen Maschinen meist über die Leistungselektronik. Komponenten wie das Ladegerät und der Spannungswandler sind in der Regel ebenso in denselben Kühlkreislauf integriert, da auch hier die zulässige Temperatur durch die Halbleiterelemente bestimmt sind. Die in den Stator-Kupferwicklungen entstehende Wärme (Ohm'sche Verluste) und die Lagertemperatur bestimmt im Wesentlichen die zulässige Kühlmitteltemperatur einer elektrischen Maschine. [7] [15]

Im Temperaturbereich von 25°C bis 35°C weist die Lithium-Ionen-Batterie die größte Leistungsfähigkeit bei akzeptablem Alterungsverhalten auf. Da die Zellalterung mit steigender Temperatur zunimmt, sollte das Thermomanagement des Batteriesystems eher an der unteren Temperaturgrenze ausgelegt

werden. Allerdings darf die Temperatur auch nicht zu niedrig sein, da der Innenwiderstand der Zellen bei Betriebstemperaturen unter 20°C ansteigt, wodurch sich die entnehmbare Leistung verringert. Bei Zelltemperaturen unter 0°C treten spezielle Alterungsprozesse auf, die zu dauerhaften Schäden an den Zellen führen können. [14] [39]

Bei Temperaturen über 55°C beginnt die thermische Zersetzung des Elektrolyten, wodurch sich in weiterer Folge die Zellen entzünden kann. Um Fehlfunktionen und Beschädigungen der Bauteile zu verhindern, muss das Kühlsystem so effizient ausgelegt sein, dass die maximal zulässige Temperatur unter allen Umgebungs- und Betriebsbedingungen eingehalten werden kann. Wird dennoch eine Temperaturobergrenze überschritten, wird die Leistungsabgabe der Batterie durch das Batteriemanagementsystem reduziert. Dieser Vorgang wird auch als „de-rating“ bezeichnet und kommt bei den meisten Fahrzeugen bei nutzungsuntypischen längeren Hochleistungsphasen zum Einsatz, z.B. beim Betrieb auf einer Rennstrecke. Im Extremfall kann die Leistungsabgabe des Batterie auch vollkommen unterbrochen werden. [39]

Kühlmethoden zur Zelltemperierung

Die Grundlage für ein effizientes Thermomanagementsystem der Batterie bildet ein effektives Kühlkonzept auf Zellebene. Dies hängt im Wesentlichen von der Zellchemie, dem äußeren und inneren Aufbau der Zelle sowie dem abzuführenden Wärmestrom ab. Abbildung 3-11 zeigt die wesentlichsten Kühlkonzepte für die Einzelzelle in schematischer Form: [39]

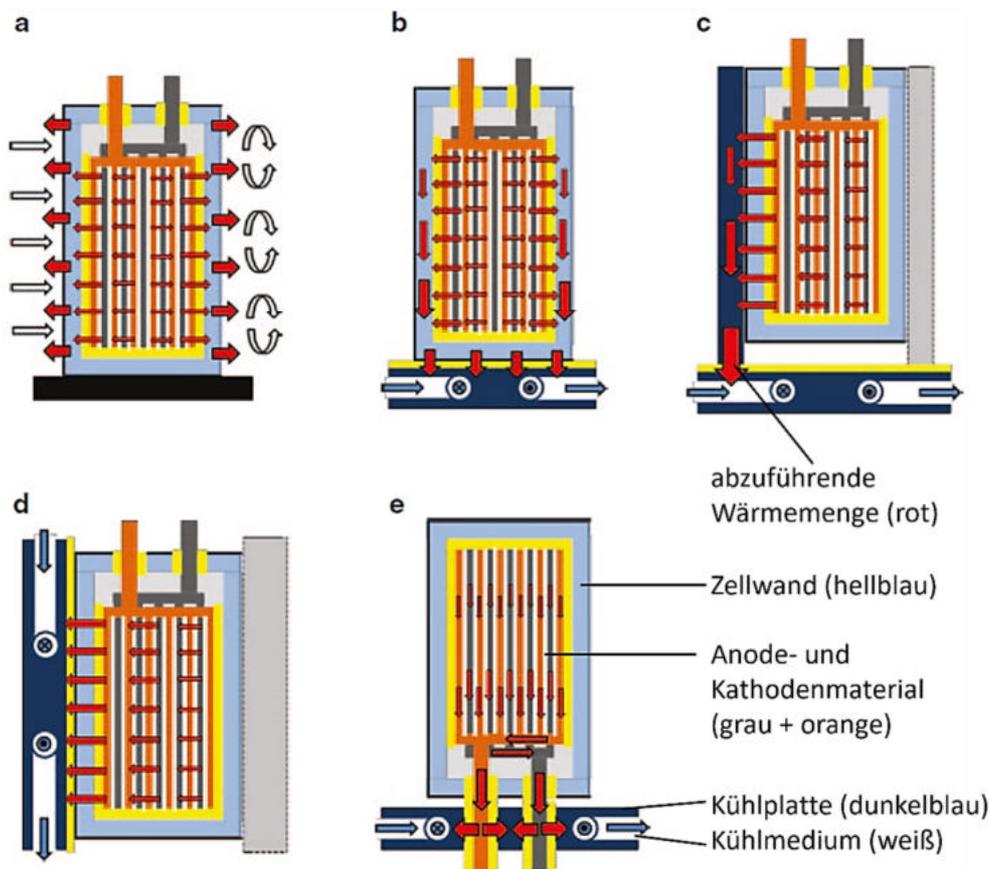


Abbildung 3-11: Methoden der Zellkühlung: (a) Luftkühlung, (b) Bodenkühlung, (c) passive Seitenkühlung, (d) aktive Seitenkühlung, (e) Ableiterkühlung [39]

Ein wesentlicher Effekt ist dabei die Wärmeleitung innerhalb der Zelle. Der Wärmeleitungskoeffizient ist in der Ebene der Zellschichten etwa um den Faktor 30 höher als Normal dazu. In vielen Fällen ist daher die Kühlung der Grund- oder Deckflächen einer Zelle effektiver, obwohl diese kleiner ist als seine Umfangs- oder Seitenflächen.

- a) Eine Variante zur Kühlung der Zellen stellt die Luftkühlung (a) dar. Dabei werden die Einzelzellen von der Kühlluft umströmt, sodass die frei zugänglichen Oberflächen gekühlt werden. Diese Art der Kühlung erfordert keine direkte thermische Anbindung der Zellen, sodass die Integration in das gesamte Kühlsystem einfach umgesetzt werden kann. Die Kühlluftkanäle zwischen den einzelnen Zellen benötigen jedoch viel Bauraum, außerdem sind die Kühleffizienz und die gleichmäßige Kühlung der Zellen oft nicht optimal.

Die Wärmeabfuhr der Zellen erfolgt bei den Kühlvarianten mit thermischer Kontaktierung (b, c, d, e) über eine Kühlplatte, die in der Regel aus Aluminium besteht. Die Anbindung an das Kühlsystem ist allerdings etwas komplexer, da die Kühlelemente in direktem Kontakt mit den elektrischen Komponenten des Batteriesystems stehen.

- b) Sind die Zellen mit geringer Höhe und ausreichend dicken Zellwänden ausgeführt, so ist es ausreichend nur den Boden der Zellen mit einer Aluminium-Kühlplatte zu verbinden.
- c) Um den Wärmetransport zu dieser Kühlplatte zu fördern, können noch zusätzliche Wärmeleitelemente zwischen den Zellen integriert werden. Allerdings steigen dadurch die Kosten sowie das Gewicht der Kühlung.
- d) Flüssigkeitsführende Kühlbleche zwischen den Zellen nutzen den kürzeren Wärmeleitpfad vom inneren der Zellen bis zur Kühlflüssigkeit, haben allerdings den Nachteil der schlechten Wärmeleitfähigkeit in diese Richtung. Diese Art der Zellkühlung ermöglicht eine hohe Homogenität der Temperatur über die Höhe der Zellen.
- e) Eine weitere Variante einer sehr effizienten Kühlung stellt die Ableiterkühlung (e) dar, bei der das Innere der Zelle direkt über die Elektroden gekühlt wird. Hierfür eignen sich vor allem Pouch-Zellen, da diese mit flachen Ableitern ausgeführt sind und dadurch eine gute Kontaktierungsmöglichkeit aufweisen.

Kühlung des Batteriesystems

Die Verwendung von reiner Umgebungsluft für die Kühlung der Batterie ist insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen nicht geeignet, da der Temperaturunterschied zwischen der Umgebung und der maximalen Batteriebetriebstemperatur meist zu gering ist, um die anfallende Wärme abführen zu können. Deshalb ist eine aktive Kühlung des Batteriesystems erforderlich, wobei dies grundsätzlich durch die Anbindung an den Kältekreislauf der Klimaanlage erreicht wird. Dabei kann die Batterieabwärme über klimatisierte Luft, direkt über das Kältemittel aus dem Kältemittelkreislauf oder über einen separaten Kühlmittelkreislauf abgeleitet werden. Abbildung 3-12 zeigt den schematischen Aufbau dieser drei Batteriekühlkonzepte. [39]

- **Kühlung mit klimatisierter Luft (a)**

Bei der Kühlmethode mit klimatisierter Luft wird die gekühlte Luft durch große Kanäle in die Batterie geleitet. Dabei wird die Luft entweder direkt von der Klimaanlage der Fahrgastkabine oder von einem eigenen Klimagerät bereitgestellt. Nach Durchströmung der Luft durch die Batterie und entlang der Zellen wird die erwärmte Luft normalerweise direkt an die Umgebung abgegeben. Diese einfache Methode der Batteriekühlung hat jedoch einige Nachteile, wie die großen Luftführungs Kanäle, das Gewicht des Gebläses, Störgeräusche vom Gebläse im Innenraum sowie die notwendige Luftfilterung. Wenn allerdings die Innenraumklimatisierung zur Kühlung verwendet wird, kann die Batterie nicht unabhängig vom Fahrgastraum gekühlt werden. Um diesen Zielkonflikt zu vermeiden, kommt häufig ein separates Kleinklimagerät zum Einsatz. [7] [39]

Diese Methode ist Abbildung 3-12 als Teilbild (a) ersichtlich. Der Kühlkreislauf wird mit einem handelsüblichen Kühlmittel betrieben. Die orangenen Linien und Flusspfeile beschreiben den warmen Pfad des flüssigen und komprimierten Kühlmittels. Die Komprimierung erfolgt durch einen Kompressor, dargestellt durch das kreisrunde graue Symbol. Das erwärmte Kühlmittel wird im Kondensator verflüssigt und mit Umgebungsluft abgekühlt. In weiterer Folge wird das unter Druck stehende Kühlmittel durch ein Ventil entspannt, verdampft dabei und kühlt stark ab (blaue Seite des Kühlkreislaufs). Das abgekühlte Kühlmittel kann über den Verdampfer die Wärme der Batterie oder der Fahrgastkabine aufnehmen und wird zum Kompressor zurückgeführt. [39]

Die Kühlung der Batterie erfolgt in dieser Abbildung über den Luftstrom eines Ventilators durch einen eigenen Batterieverdampfer. Jedoch sind das zusätzliche Gewicht sowie der zusätzlich benötigte Bauraum für das separate Klimagerät als nachteilig zu betrachten. Bei dieser Methode mit Batterieverdampfer kann jedoch die Batteriekühlung im reinen Umluftbetrieb erfolgen, sodass auf die Filterung der Luft verzichtet werden kann. Dieses Kühlkonzept mit klimatisierter Luft ist demnach hauptsächlich für Fahrzeuge mit genügend Bauraum, wie beispielsweise in Geländewagen (SUV) und kleinere Batterien (Hybride), geeignet. [39]

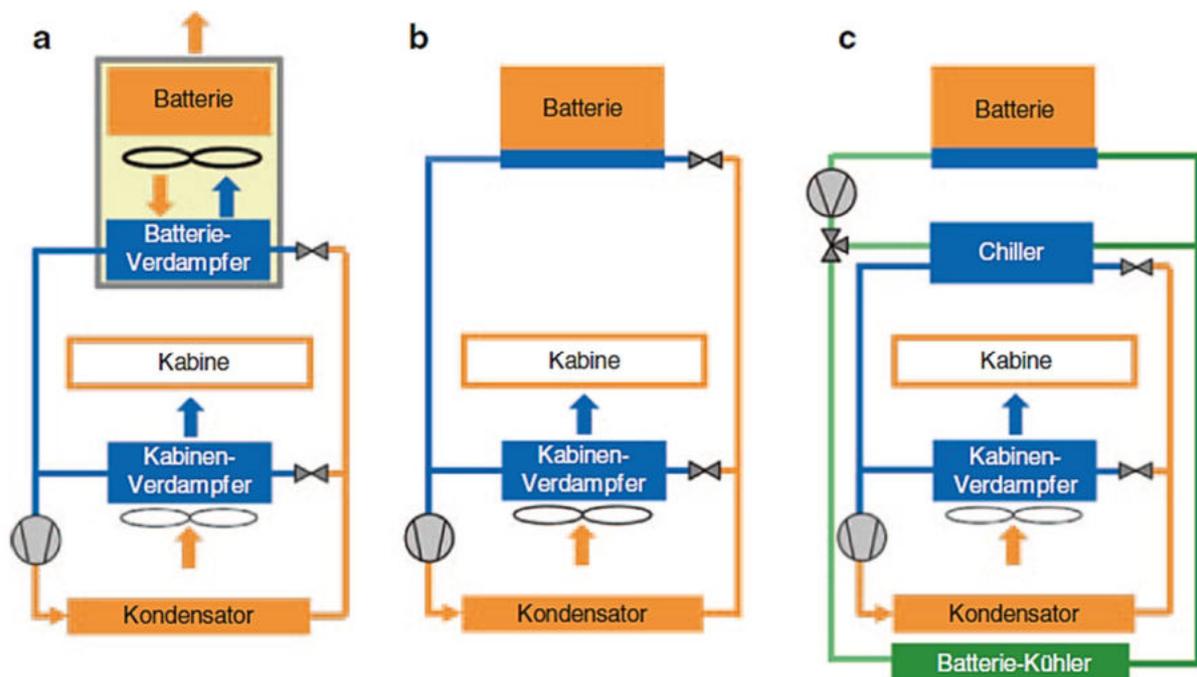


Abbildung 3-12: Schematische Darstellung der Batterie-Kühlkonzepte: mit Luft (a), mit Kältemittel direkt (b), mit Kühlfüssigkeit in einem Sekundärkreislauf (c) [39]

- **Kühlung direkt mit Kältemittel (b)**

Die kompakteste und zugleich einfache Methode der Batteriekühlung ist die direkte Kühlung über das Kältemittel der Klimaanlage. Dabei befindet sich ein kompakter Verdampfer in Form einer Kühlplatte im Inneren der Batterie, welcher in thermisch leitenden Kontakt mit den Lithium-Ionen-Zellen steht, siehe Teilbild (b) in Abbildung 3-12. Die zum Verdampfen des Kältemittels benötigte Wärme wird durch die Abwärme der Batterie bereitgestellt, so dass eine effiziente Kühlung der Lithium-Ionen-Zellen ermöglicht wird. Die Ausführung der Kühlplatten ist dabei sehr anspruchsvoll, da das verdampfende Kältemittel zu jeder Zeit und an jedem Ort verfügbar sein muss, sodass eine gleichmäßige Temperaturverteilung sichergestellt werden kann. Der Batterieverdampfer ist parallel zum Klimaanlageverdampfer angeordnet, was zu einer weitgehenden Entkopplung vom Klimatisierungsbedarf im Fahrzeug führt. Für eine aktive Batteriekühlung ist immer ein elektrischer Klimakompressor erforderlich. Allerdings ist der zusätzliche Leistungsbedarf im Vergleich zum Innenraumklimasystem gering. Der Nachteil dieses Konzepts ergibt sich aus dem geringen Kühlbedarf der Batterie im Winter, für den jedoch der Klimakompressor Leistung erbringen muss und somit die Gesamteffizienz verschlechtert. Deshalb werden kältemittelgekühlte Batteriesysteme zumeist in Fahrzeugen genutzt, welche eine platzsparende Batteriekühlung benötigen und bei denen der Verbrauch von Zusatzleistung des Kompressors nicht zu einem Nachteil beim Gesamtwirkungsgrad führt. [39]

- **Kühlung mit Kühflüssigkeit in einem Sekundärkreislauf (c)**

Die Variante mit Kühflüssigkeit in einem Sekundärkreislauf stellt die flexibelste Methode zur Kühlung des Batteriesystems dar, siehe Teilbild (c) in Abbildung 3-12. Der Einsatz eines zusätzlichen Batterie-Kühlmittelkühlers ermöglicht zudem eine energieeffiziente Kühlung des Batteriesystems. Bei dieser Methode ist die Batterie mit einer Kühflüssigkeit durchströmten Kühlplatte ausgestattet, wobei die Kühflüssigkeit aus einem Sekundärkreislauf zur Verfügung gestellt wird. Die Abwärme des Batteriesystems wird dabei über die Kühlplatte an die Kühflüssigkeit abgegeben. Durch eine geeignete Verlegung des Kreislaufs kann sowohl eine gute Temperaturverteilung über die Kühlplatte als auch eine gleichmäßige Erwärmung der Kühflüssigkeit erreicht werden. [39]

Zur Abkühlung der erwärmten Kühflüssigkeit wird ein sogenannter Chiller (Wärmetauscher) eingesetzt, welcher den Sekundärkreislauf und den Kältekreislauf der Klimaanlage verknüpft. Dabei wird im Chiller der Kühflüssigkeit Wärme entzogen, indem das Kältemittel verdampft. Die Wärme des verdampften Kältemittels wird über einen Kältemittelkühler (Gaskühler) an die Umgebung abgegeben, sodass in der Folge ein abgekühltes und kondensiertes Kältemittel zur Verfügung steht. Je nach Kühlungsbedarf kann über den Batterie Kühler direkt mit Umgebungsluft oder über den Chiller des Klimakreislaufes gekühlt werden. Eine Umkehr der Flussrichtung durch den Chiller bewirkt eine Wärmepumpenfunktion und kann zur Beheizung verwendet werden. [39]

Auch wenn die heute verfügbaren Chiller eine hohe Leistungsdichte aufweisen, so haben sie doch den Nachteil des großen Platzbedarfs außerhalb der Batterie. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zum Betrieb neben dem Chiller eine Pumpe, Leitungen und möglicherweise ein weiterer Kühler und ein Ventil benötigt werden. Es wird typischerweise ein zusätzlicher Niedertemperaturkühler in den Sekundärkreislauf integriert, um bei niedrigen Umgebungstemperaturen (Winter) nicht unnötige Energie für den Betrieb des Klimakompressors zu verbrauchen. Bei hohen Außentemperaturen (Sommer) erfolgt die Batteriekühlung hingegen mit dem Chiller. [39]

Abbildung 3-13 zeigt ein ausgeführtes Kühlsystem einer Hochvolt-Batterie mit den erforderlichen Komponenten für die Kühlung über den Chiller. Ein in das Thermosystem eingebundener HV-Luftheizer hat dabei den Vorteil, dass die Wärme z.B. zur Enteisung der Front- und Heckscheibe sowie zur Kabinenbeheizung sofort zur Verfügung steht, und nicht erst nach Warmlaufen der VKM.

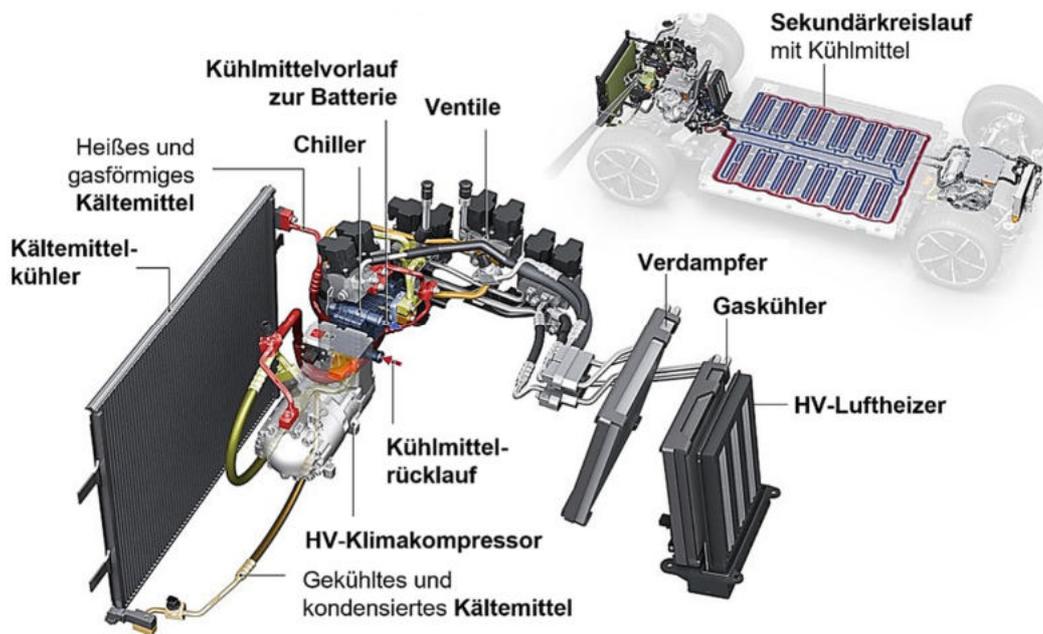


Abbildung 3-13: Kühlung der Hochvolt-Batterie über den Chiller [75]

Abbildung 3-14 zeigt zwei verschiedene Kühlvarianten für die Batteriekühlung. Im linken Teilbild ist eine ausgeführte Luftkühlung für die Lithium-Ionen-Batterie eines Vollhybridfahrzeugs ersichtliche. Diese Batterie kann je nach Anforderung auf zwei Arten mit Luft gekühlt werden. Bei geringer thermischer Belastung der Batterie wird diese über ein Gebläse mit klimatisierter Luft aus der Fahrzeugkabine gekühlt. Ab einem bestimmten Temperatur-Schwellwert erfolgt die Kühlung mit Luft über einen von der Fahrzeugklimatisierung unabhängigen Kältekreislauf. Dieser ist an die Klimaanlage des Fahrzeugs gekoppelt und verwendet dabei einen eigenen Verdampfer. [7] [46]

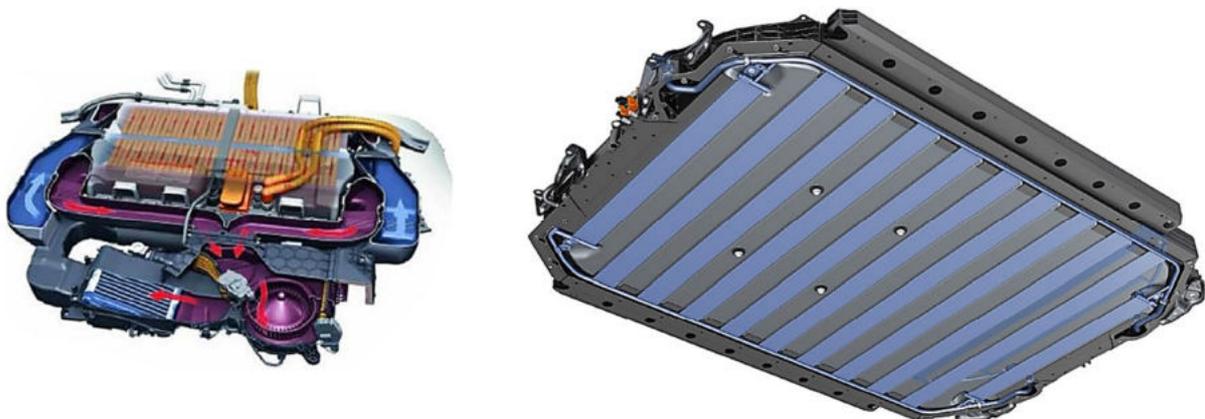


Abbildung 3-14: Ausgeführte Kühlungsvarianten: Luftkühlung (links) und Flüssigkeitskühlung (rechts) [7] [46]

Das rechte Teilbild zeigt hingegen eine ausgeführte Flüssigkeitskühlung für eine Hochvolt-Batterie mit Pouch-Zellmodulen. Dabei ist das Kühlsystem außen am Gehäuse verklebt, um im Crashfall maximale Sicherheit gegen Kühlmiteleintritt in den Innenraum der Batterie zu bieten. Die Wärme wird dabei

quer zum Batteriesystem über fluiddurchströmende Aluminium-Strangpressprofile abgeführt. Als Kühlmedium kommt ein Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz, wodurch eine optimale thermische Anbindung zur Gehäusewanne erreicht wird. [39] [46]

Batteriebeheizung

Die rein elektrische Reichweite kann sich bei niedrigen Umgebungstemperaturen im Winter um bis zu 50 Prozent verringern. Dies ist, neben der verringerten Batteriekapazität, vor allem auf den Strombedarf zur Beheizung der Batterie und der Fahrgastzelle zurückzuführen. Wird die Batterie über einen Sekundärkreislauf mit Kühlmittel gekühlt, werden zur Beheizung in der Regel Wärmepumpen eingesetzt. Ein Beheizungssystem mit einer Wärmepumpe ermöglicht eine genaue Dosierung der eingebrachten Energiemenge, das Vorheizen der Batterie vor Fahrtritt und eine bessere Ausnutzung der dafür notwendigen elektrischen Energie. In fortschrittlichen Thermomanagementsystemen wird neben der Wärmepumpe auch die Verlustwärme des gesamten Antriebssystems für Heizungszwecke genutzt. Damit können alle flüssigkeitsgekühlten Verlustenergien gesammelt werden, mithilfe des Wärmepumpenprinzip angehoben und für Heizzwecke benutzt werden. [39]

Kühlung elektrischer Achsantriebseinheiten

Elektrifizierte Achsantriebe werden in der Regel über ein Flüssigkeitskühlsystem gekühlt. Die dabei verwendeten Kühlflüssigkeiten sind vorwiegend Wasser-Glykol-Gemische oder Öl. Es ist jedoch zu beachten, dass bei direktem Kontakt mit den Kupferwicklungen nicht leitfähige Flüssigkeiten verwendet werden müssen, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Für solche Anwendungen kommen normalerweise spezielle Öle oder nichtleitende Kühlmittel zum Einsatz. [7] [15]

Ein sehr häufig angewandtes Kühlkonzept ist die Wärmeabfuhr über das Gehäuse des Stators der elektrischen Maschine. Dabei zirkuliert die Kühlflüssigkeit in den Kühlkanälen am Umfang des Gehäuses. Bei diesem Konzept besteht kein direkter Kontakt zwischen dem Kühlmedium und den Kupferwicklungen im Stator. Denkbar sind auch Kühlkanäle im Blechpaket des Stators. Für extreme Kühlanforderungen könnten Kühlkanäle auch direkt in die meist prismatischen Vollkupferwicklungen eingebracht werden. Um bei sehr stark belasteten elektrischen Maschinen zusätzliche Wärme abzuführen, wird nichtleitendes Kühlmittel oder Öl direkt auf den Rotor und auf die Wicklungsköpfe des Stators gesprüht. [7] [15]

Eine weitere Variante, um die hohen Leistungsanforderungen der E-Maschine zu erfüllen, ist die Innenkühlung des Rotors mit Kühlflüssigkeit. Diese Kühlmethode wird meist bei Asynchronmaschinen eingesetzt, um im Gegensatz zur PSM die etwas höheren Wärmemengen des Rotors abzuführen. Die größte Wärmeentwicklung einer elektrischen Maschine tritt normalerweise in den Kupfer-Endwicklungen des Stators auf. Eine effiziente Kühlung hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Überlastungsfähigkeit einer Elektromaschine. Bei vollelektrischen Fahrzeugen ist der Antriebsmotor mit Leistungselektronik typischerweise in einem Mitteltemperaturkreislauf integriert. Bei Hybridfahrzeugen ist die elektrische Maschine hingegen häufig in den Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors eingebunden. [7] [15]

- **Ausgeführte Kühlmethoden einer PSM und ASM**

Das linke Teilbild der Abbildung 3-15 zeigt eine Flüssigkeitskühlung einer Leistungselektronik und des Stators einer permanent erregten Synchronmaschine von einem vollelektrischen Fahrzeug. Der Kühlmittelzufluss in den elektrischen Antrieb geschieht zuerst über die Leistungselektronik, weil die Leistungs-Halbleiterelemente die höchstzulässige Kühlmitteltemperatur festlegen. Nach dem Durchströmen der Leistungselektronik wird die Kühlflüssigkeit über ein abdichtendes Steckrohrelement in die Kühlkanäle des Gehäuses der E-Maschine geleitet. Die hauptsächlich durch ohmsche Verluste in den Kupferwicklungen des Stators auftretende Wärme wird über das Isolationssystem sowie das Blechpaket an die Kühlflüssigkeit im Kühlmantel des Gehäuses abgeleitet. Dabei wird das Kühlmittel durch umlaufende Kühlkanäle zwischen Stator und Maschinenaußengehäuse geleitet. Am Ende des Kühlmantels wird die erwärmte Flüssigkeit über einen Wasserstutzen in den Kühlkreislauf des Fahrzeugs eingebracht und die Wärme über einen Kühler an die Umgebung abgegeben. [11]

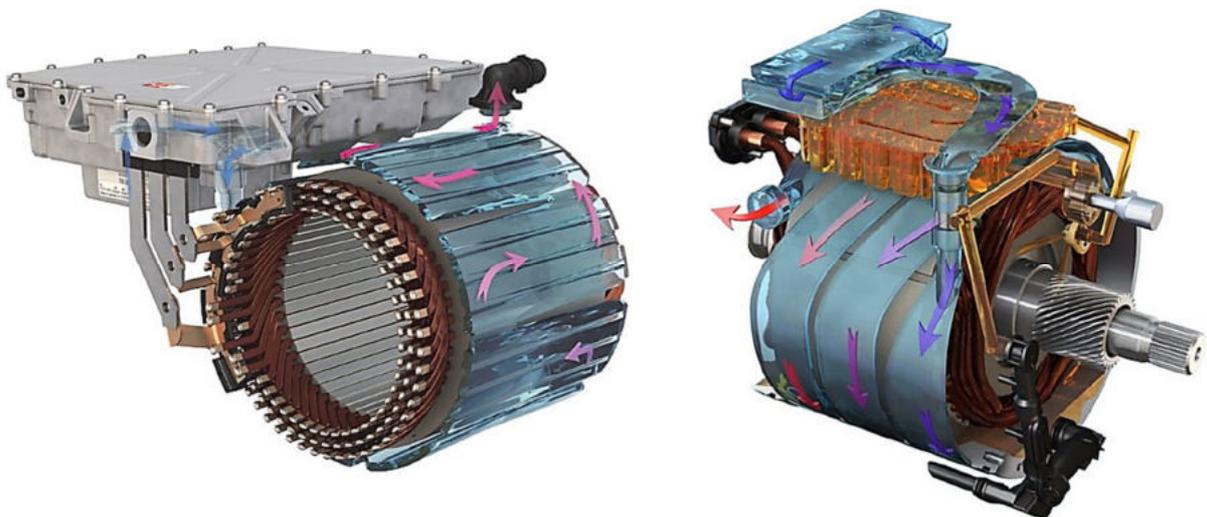


Abbildung 3-15: Kühlmitteldurchfluss durch Leistungselektronik und Kühlkanäle des Stators einer PSM (links) und kombinierte Kühlmittel und Ölkühlung einer ASM (rechts) [11] [63]

Das rechte Teilbild der Abbildung 3-15 zeigt ein kombiniertes Flüssigkeits- und Ölkühlungssystem einer Asynchronmaschine mit dazugehöriger Leistungselektronik. Die Wärmeabfuhr des elektrischen Achsantriebs wird hier sowohl durch ein Kühlmedium als auch durch Öl realisiert. Die Kühlflüssigkeit wird wiederum zuerst durch die Leistungselektronik geführt, sodass eine möglichst effektive Kühlung der Halbleiterelemente erreicht wird. Nach Durchströmung der Leistungselektronik tritt die Kühlflüssigkeit über ein abdichtendes Verbindungselement in den Kühlmantel des Gehäuses der elektrischen Maschine ein. Ein Teil der Abwärme des Rotors der E-Maschine wird über den Luftspalt an den Kühlmantel des Stators abgeführt. Über einen Kühlmittelverteiler am Ende des Kühlmantels wird das Kühlfluid in den externen Kühlmittelkreislauf des Fahrzeugs eingespeist, sodass die Wärme über einen Kühler an die Umgebung abgeführt werden kann. [63]

Da die Abwärme von den Kupferwicklungen im Stator sowie dem Kurzschlusskäfig im Rotor über mehrere thermischen Widerstände an den Kühlmantel abgeleitet wird, kann nur begrenzt Wärmemenge von den Komponenten in das Kühlmittel geleitet werden. Um die Asynchronmaschine jedoch stärker beanspruchen zu können, erfordern insbesondere die elektromagnetisch wirksamen Bauteile der elektrischen Maschine einen zusätzlichen Kühlungsbedarf. Diese Kühlung wird durch den direkten Kontakt mit Öl erzielt, welches ebenso zur Schmierung der Lagerstellen sowie der

Verzahnungskomponenten eingesetzt wird. Um dies zu erreichen, wird sowohl für die elektrische Maschine als auch für das Getriebe eine gemeinsame Ölmanagementstrategie angewandt. Für den Ölkreislauf ist allerdings eine separate Ölpumpe erforderlich, die über die Zwischenwelle des Getriebes angetrieben wird. [63]

In Abbildung 3-16 ist eine ausgeführte Ölkühlung des Rotors und des Stators ersichtlich. Das Öl wird dabei von der mechanisch angetriebenen Ölpumpe angesaugt und durch einen Öl-Kühlmittel-Wärmetauscher gepumpt, der einen Teil der Wärme vom Öl an die Kühlflüssigkeit überträgt. Dieser Wärmetauscher ist in ein eigenes Gussgehäuse mit verschlossenem Deckel integriert und befindet sich zwischen der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik. [63]

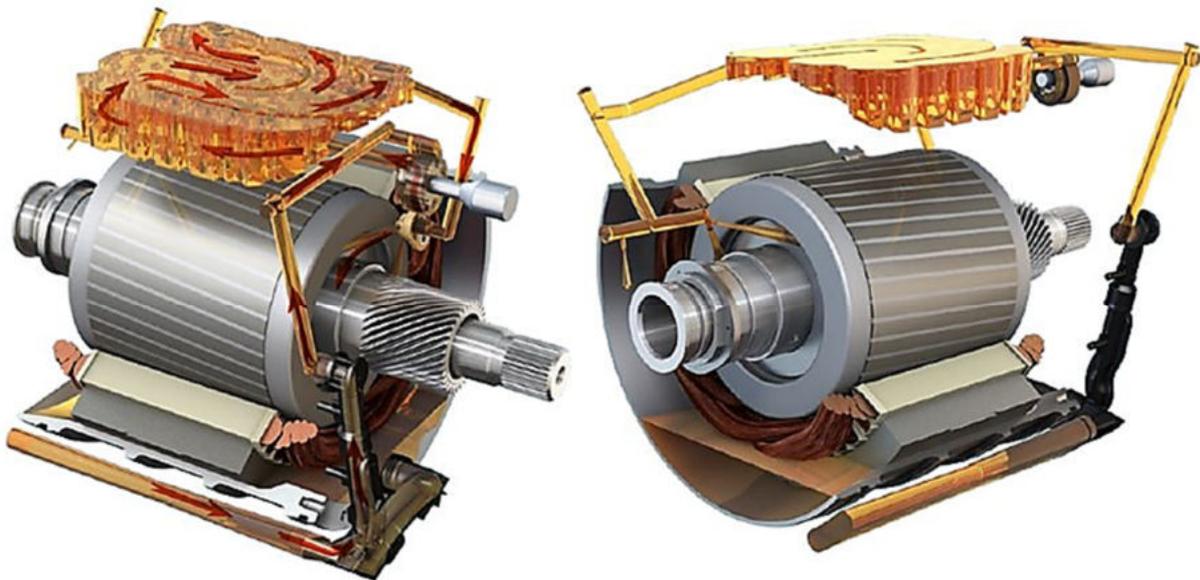


Abbildung 3-16: Ölkühlung des Rotors und der Kupferwicklungen des Stators einer ASM [63]

Das vom Wärmetauscher gekühlte Öl wird über die dafür vorgesehenen Kanäle im Gussgehäuse zu den Kurzschlussringen des Rotors transportiert. Von den Kurzschlussringen wird das Öl durch die Zentrifugalkraft des rotierenden Rotors in Richtung der Wicklungsüberstände des Stators geschleudert, sodass das Öl die in den Spulen entstehende Verlustwärme aufnehmen kann. Das nun erwärmte Öl wird an der tiefsten Stelle des Gehäuses gesammelt und dann von der Ölpumpe wieder angesaugt. Neben der Schmierfunktion übernimmt die Ölfüllung demnach auch eine Kühlfunktion. Durch die kombinierte Kühlmittel- und Ölkühlung ist es möglich, die Betriebsgrenzen der Antriebsmaschine deutlich zu erweitern. Vor allem die konstante Leistungsabgabe der Asynchronmaschine profitiert von der direkten Ölkühlung vom Rotor und Stator. [63]

Abbildung 3-17 zeigt zwei ausgeführte wassergekühlte Kühlsysteme sowohl von einem achsparallelen (links) als auch von einem koaxialen (rechts) elektrischen Achsantrieb mit Asynchronmaschine. Der Kühlmittelzufluss in die elektrischen Antriebe geschieht zuerst über die Leistungselektronik.

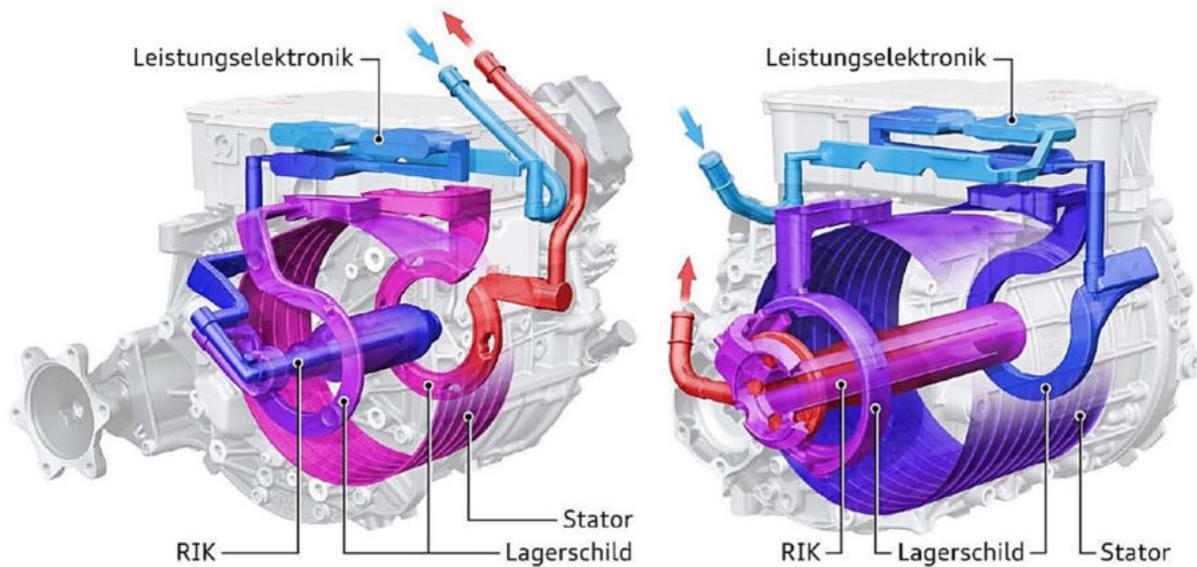


Abbildung 3-17: Kühlsysteme von zwei elektrischen Achsantrieben mit Lagerschild- und Rotorinnenkühlung [51]

Die in den Stator-Kupferwicklungen auftretende Wärme wird über das Isolationssystem sowie das Blechpaket an die Kühlflüssigkeit im Kühlmantel des Gehäuses abgeleitet. Dabei wird das Kühlmittel durch umlaufende Kühlkanäle zwischen Stator und Maschinenaußengehäuse geleitet. Die Lagerschilder der E-Maschinen sind ebenfalls wassergekühlt, sodass die Rotorlagertemperatur gezielt reduziert werden kann. Um die hohen Leistungsanforderungen der Asynchronmaschinen zu erfüllen, kommt bei diesen Antriebseinheiten eine Rotorinnenkühlung (RIK) zum Einsatz. Bei dieser Art der Kühlung ist das Innere der Rotorwelle fester Bestandteil des Kühlsystems und wird vollständig mit Kühlmittel durchströmt. Die Abdichtung und Zufuhr der Kühlflüssigkeit, zu der sich drehenden Rotorwelle, wird durch Gleitringdichtungen mit verschleißfreien Siliziumcarbid-Dichtringen realisiert. [51]

3.3 Ladetechnik

Lademöglichkeiten

Um das Hochvolt-Batteriesystem bei vollelektrischen- und Plug-In-Hybridfahrzeugen aus einer externen Quelle zu laden, werden verschiedene Möglichkeiten genutzt. Hauptsächlich werden Kontaktsysteme mit Ladekabel genutzt. Eine permanente Energieversorgung mittels Stromschiene, Oberleitung oder induktiv ist zwar möglich, aber findet in der Regel bei Straßenfahrzeugen noch geringe Anwendung. Das kabellose induktive Laden bildet eine interessante Möglichkeit für ein komfortables Alltags-Ladeszenario im PKW-Bereich, hat sich aber aufgrund der geringen Ladeleistungen, hohen Platzbedarf und Gewicht, sowie Sicherheitsbedenken bisher noch nicht durchgesetzt. [14] [15]

Grundsätzlich kann die Hochvoltbatterie mit Wechsel- oder direkt mit Gleichstrom aufgeladen werden. Um das Fahrzeug am ein- oder dreiphasigen Wechselstromnetz zu laden, sind Ladegeräte für die Umwandlung in einen Batteriegleichstrom erforderlich. Diese Geräte sind bei Ladeleistungen bis zu 20 kW in der Regel im Fahrzeugbordnetz integriert und werden deshalb auch als On-Board-Ladegerät bezeichnet. Bei größeren Leistungen sowie beim Schnellladen mit Gleichstrom sind die Ladegeräte, wegen des hohen Gewichtes und Bauraums, extern in der jeweiligen Ladestation integriert. Dies bedarf jedoch einer intensiven Kommunikation zwischen Ladestation und Fahrzeug zur interaktiven Umsetzung der Ladestrategie. Beim Gleichstrom-Schnellladen entstehen zum Teil hohe Verlustleistungen an Ladesäule und Batterie von bis zu 10% der Ladeleistung, in Einzelfällen auch mehr. Dadurch müssen Ladesäule und Batterie aktiv gekühlt werden und miteinander kommunizieren. Der Ladestrom muss dazu auf die Leistungs- und Kühlkapazitäten beider Systeme eingestellt werden, siehe Abschnitt „Ladeverhalten“. [14]

Im öffentlichen Umfeld wird das Laden des Batteriesystems in der Regel in zwei Anwendungsbereiche untergliedert. Es wird zwischen der Aufladung entlang der Strecke und der Aufladung am Zielort unterschieden. Um während der Fahrt nicht zu viel Zeit durch lange Ladezeiten zu verlieren, ist die Verfügbarkeit einer Schnellladeinfrastruktur auf der Langstrecke ein wichtiges Kriterium. Derzeitige Schnellladefunktionen zielen auf das Nachladen von ca. 80% der Batteriekapazität in 30-50 Minuten ab. Um die Ladedauer noch weiter zu reduzieren sind Spannungslagen mit 400 Volt nicht mehr ausreichend. Daher ist der Wechsel zu einem höheren Spannungsniveau notwendig, um die Ladeleistung zu erhöhen. Die Stromstärke sollte dabei nicht gesteigert werden, da diese quadratisch in die Verlustleistung der Ladeeinrichtung und Leitungen eingeht. [76]

Ladeoption	Ladeleistung [kW]	Kabel	Ladezeit für 100 km	Ladeelektronik
Haushaltsteckdose 230V	bis 3,7	AC	5 - 6 Stunden	im Fahrzeug
Wechselstromladen Privat 400V /16A	bis 11	AC	bis 2 Stunde	im Fahrzeug
Wechselstromladen öffentlich 400V / 64A	bis 44	DC	Bis ½ Stunde	in Ladestation u. Fzg
Gleichstromladen	bis 350	DC	4 – 25 Minuten	in Ladestation u. Fzg
Pantograph/Oberleitung	bis Megawatt	DC (AC)	4 – 20 Minuten	in Infrastruktur u. Fzg.
Induktives Laden	3 - 22	kabellos	1 – 5 Stunden	in Infrastruktur u. Fzg.
Induktive Fahrbahn	20 - 200	kabellos	Energieaufnahme während Fahrt	in Infrastruktur u. Fzg.
Batteriewechsel	-	kabellos	ca. 5 Minuten Batteriewechselzeit	Infrastrukturseitig

Tabelle 3-3: Lademöglichkeiten für Batteriesysteme mit Ladeleistungen und Ladezeiten [76]

In Tabelle 3-3 sind typische Ladeoptionen für Batteriesysteme in vollelektrischen Fahrzeugen ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass Ladezeiten unter 10 Minuten für eine 80% Vollladung derzeit eher theoretische Werte sind, da die Zellen aus elektrochemischer Sicht diese Zeit benötigen, um die Ionen und Ladungen zwischen Kathode und Anode umzulagern.

Das Laden über eine Oberleitung mittels Pantographen (Stromabnehmer) ist optimal geeignet, um große Energiemengen in kurzer Zeit zu übertragen, wie zum Beispiel für Busse sowie Schienen- und Nutzfahrzeuge. Bei einer induktiven Fahrbahn erfolgt die Energieaufnahme während der Fahrt über einen speziellen Asphalt. Eine solche Art der Aufladung ist allerdings für den PKW-Verkehr nicht energie- und kosteneffizient realisierbar. Der Batteriewechsel wäre die schnellste Art, um eine vollständig geladene Batterie zu erhalten. Diese Methode wird jedoch aufgrund der fehlenden Bereitschaft, der Schwierigkeiten und begrenzten Möglichkeiten zur Standardisierung des Batteriesystems derzeit nicht angewendet. [7] [14] [15]

Ladezustände

Abbildung 3-18 zeigt einen Vergleich von theoretischen Ladezeiten für das Laden von 100 km in Abhängigkeit von verschiedenen Ladeleistungen, bei Annahme eines Energieverbrauchs von 15kWh/100km. [77] [78]

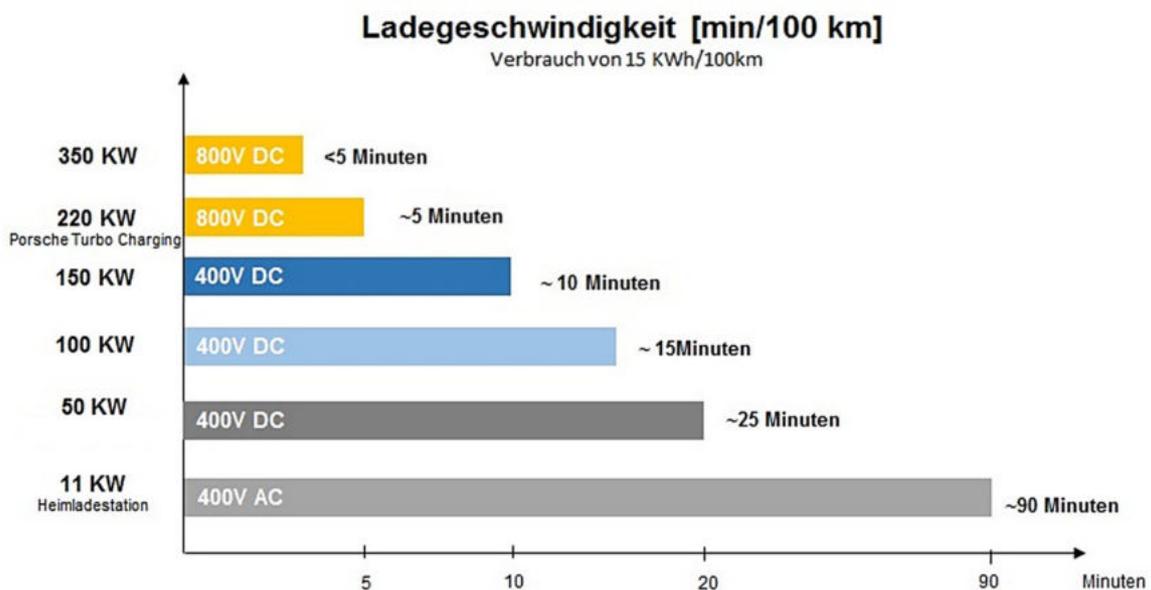


Abbildung 3-18: Vergleich von Ladezeiten in Abhängigkeit von verschiedenen Ladeleistungen [14]

- **Wechselstromladen**

Beim Laden der Batterie am einphasigen Haushalts-Wechselstromnetz mit 230 Volt und 16 Ampere wird eine Ladeleistung von 3,7 kW erreicht. An einem dreiphasigen Haushaltsnetz mit Wechselstrom wird hingegen eine Ladeleistung von 11 kW bei einer Stromstärke von 16 Ampere erzielt.

Das Laden mit einer Stromstärke von 32 Ampere ermöglicht am einphasigen Wechselstromnetz eine Ladeleistung von 7,4 kW und dreiphasig 22 kW.

Das konventionelle Wechselstromladen an der Heimpladestation sollte gegenüber dem extra Anfahren von Schnellladestationen vorgezogen werden, um den Gesundheitszustand der Batteriezellen nicht unnötig zu verschlechtern.

- **Gleichstromladen**

Ein weiterer Lademodus ist das Schnellladen am Wechselstromnetz mit bis zu 63 Ampere und einer Ladeleistung von bis zu 43,5 kW. Hierfür ist ein Steuerungsleiter (Pilotleiter) notwendig, der ständig mit den am Wechselstromnetz angeschlossenen Geräten verbunden ist und so den maximal zulässigen Ladestrom kodiert. Beim Schnellladen erfolgt der Anschluss des Fahrzeugs an das Wechselstromnetz der Netzinfrastruktur indirekt über ein externes Gleichstrom-Ladegerät, welches in der Hochleistungs-Ladestation integriert ist. Bei Gleichstromschnellladen mit 400 V und 250 A kann z.B. eine Ladeleistung von 100kW erzielt werden. [78]

Aktuell kann das Laden mit einer maximalen Stromstärke von bis zu 350 Ampere und 1000 Volt Gleichstrom eine maximale Ladeleistung der Station von bis zu 350 kW ermöglichen. Auch hier ist ein Pilotleiter erforderlich, um die Ladeleistung zeitlich zu steuern, den ordnungsgemäßen Anschluss des Fahrzeugs zu überwachen und den Ladevorgang zu starten und zu stoppen. [78]

Ladeverhalten und Einschränkungen bei Schnellladen

Abbildung 3-19 zeigt das charakteristische Ladeverhalten einer Lithium-Ionen-Batteriezelle in Abhängigkeit der Ladedauer in Stunden. Es ist ersichtlich, dass zu Beginn des Ladevorgangs der Ladestrom sehr hoch ist und konstant gehalten wird und mit zunehmender Ladedauer abnimmt.

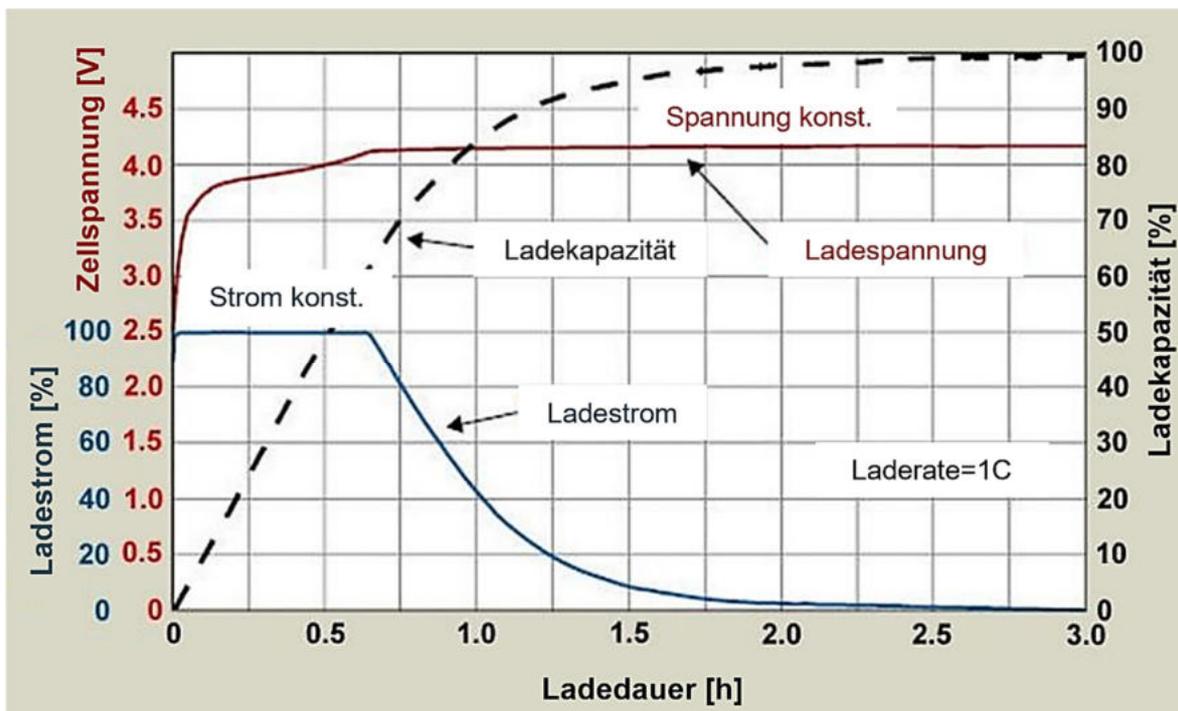


Abbildung 3-19: Ladeverhalten einer Lithium-Ionen-Batteriezelle [82]

Beim Schnellladen wird die maximal zulässige Ladestromstärke daher nur für kurze Zeit eingestellt, um die Batteriezellen vor Überhitzungen und somit vor Beschädigungen zu schützen. Daher ist die Mindestladezeit für eine Lithium-Ionen-Zelle zeitlich begrenzt und beträgt derzeit ca. 10-15 Minuten für eine 80% Ladung. Dies ist hauptsächlich auf die elektrochemische Reaktion der Lithium-Ionen-Zelle

zurückzuführen. Des Weiteren stellen die Ladepins im Stecker sowie das Gewicht und Steifheit des Ladekabels eine Begrenzung der Ladeleistung dar. [77] [78]

Im Gegensatz zur Ladekapazität steigt die Zellenspannung zu Beginn des Ladevorgangs sehr schnell an. Mit zunehmender Ladedauer steigt auch die Kapazität linear an, bis diese ab ca. 80% ein Sättigungsverhalten aufweist. Ab 80% wird eine gewisse Zeit benötigt, um eine Ladekapazität von 100% zu erreichen. Da der Einlagerungsprozess der Lithium-Ionen ab einer Ladekapazität von ca. 80% mehr Zeit beansprucht, muss der Ladestrom entsprechend reduziert werden. [82]

Ladestecker und Ladebuchsen

Die Anschluss-technologie zum Laden der Batterie von vollelektrischen- und Plug-In-Hybridfahrzeugen unterliegt in Europa einer Norm. Diese umfasst grundsätzlich die Verwendung von zwei Ladesteckern. Für das konventionelle ein- oder dreiphasige Wechselstromladen dient ein Ladestecker mit der Bezeichnung „Typ 2“. Für das Schnellladen mit Gleichstrom wird hingegen der „CCS“-Ladestecker verwendet. Im asiatischen Raum wird jedoch der „CHAdEMO“-Standard für das Gleichstrom-Schnellladen genutzt. Aufgrund von Fahrzeugimporten aus Asien sind viele Fahrzeuge mit diesem Ladebuchsen-Standard im europäischen Raum unterwegs, sodass auch entsprechende Ladestationen vorhanden sind. Diese Fahrzeuge besitzen allerdings eine zusätzliche Typ 2 Ladebuchse zum Laden mit Wechselstrom. [78] [79]

Die folgende Tabelle 3-4 zeigt diese verschiedenen Ladestecker mit ihren maximal zulässigen Spannungen, Ladeströmen und der daraus resultierenden maximal zulässigen Ladeleistung.

	Typ 2	CCS (Combined Charging System)	CHAdEMO
			
Ladegerät	Wechselstrom	Gleichstrom	Gleichstrom
Spannungslage	bis 400 V	bis 1000 V	300-400 V
Stromstärke	bis 63 A	bis 350 A	bis 350 A
Ladeleistung	bis 43,5 kW	bis 350 kW	bis 150 kW

Tabelle 3-4: Vergleich von unterschiedlichen Ladesteckern in Europa mit deren maximalen Spannungen, Ladeströmen und Ladeleistungen [78]

In Tabelle 3-5 sind die Belegungsmöglichkeiten der Pins mit Funktionen von ausgewählten Ladesteckern ersichtlich. Die Ladestecker verfügen zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation über einen PP- sowie einen CP-Anschluss. Der PP-Anschluss (Plug-Present) dient als Kontaktschnittstelle zwischen Stecker und Ladebuchse und aktiviert während des Ladevorgangs eine mechanische Verriegelung wie beispielsweise die Wegfahrsperre des Fahrzeugs. Der CP-Anschluss (Control-Pilot) wird zur Kommunikation mit der Ladestation verwendet, um über ein standardisiertes

Protokoll Information auszutauschen und so den Ladevorgang optimal steuern zu können. Dies erhöht sowohl die Sicherheit als auch die Funktionalität während des Ladevorgangs. Geometrisch entspricht die Steckerkontur und Anordnung der PP, CP und PE-Pins des Typ-2-Steckers der oberen Kontur des CCS-Steckers. Damit ist es möglich fahrzeugseitig nur eine kombinierte Typ 2/CCS Steckdose zu verbauen, die von beiden Steckern (Wechsel- oder Gleichstrom) beliefert werden kann. [7] [79]

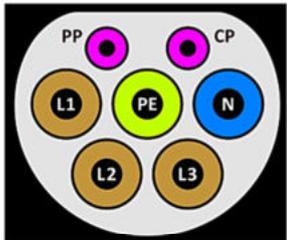
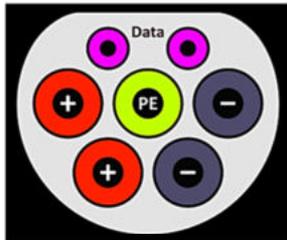
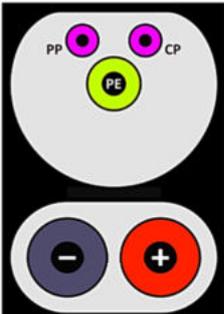
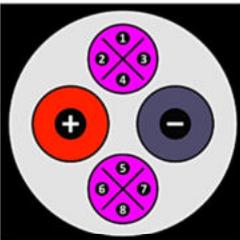
Belegungsoptionen Ladestecker							
							
Typ 2		Tesla Supercharger		CCS		CHAdeMO	
AC (ein- bis 3-phasig)		DC		DC		DC	
Pin	PP	CP	PE	L1,L2,L3,N	DC+, DC-		
Funktion	Plug Present	Control Pilot	Schutzerde	AC-Leistungskontakte	DC-Leistungskontakte		

Tabelle 3-5: Belegungsoptionen von ausgewählten Ladesteckern mit Pins und Funktionen [79]

Über die AC-Leistungskontakte ist sowohl einphasiges Laden mit Wechselstrom als auch dreiphasiges Wechselstromladen mit Drehstrom möglich. Plug-In-Hybridfahrzeuge verfügen in der Regel nur über eine Typ-2-Ladesteckdose zum Laden mit Wechselstrom. Neben der Verwendung von genormten Steckdosen auf der Netzseite sind ein Schutzleiter, ein Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schalter) sowie eine Überstromsicherheit erforderlich. Zusätzlich dazu ist das Ladekabel mit einer Steuerungsfunktion (Pilotfunktion) ausgestattet, um die Belastbarkeit des Kabels zu signalisieren. In der Regel ist bei einem solchen Ladekabel zwischen den beiden Steckern ein Steuergerät eingebunden. [7] [79]

Das Schnellladen mit Gleichstrom erfolgt bei vollelektrischen Fahrzeugen hingegen über die DC-Leistungskontakte. Der amerikanische Elektrofahrzeughersteller Tesla konzipierte ein eigenes Schnellladesystem mit Ladeleistungen bis zu 200 kW. Als Verbindungsschnittstelle zwischen Ladebuchse und Ladestation dient ein modifizierter Typ 2 Ladestecker. Dazu werden die vier AC-Kontakte für Gleichstrom umfunktioniert und ein eigenes Kommunikationsprotokoll zwischen Batteriemangement und Ladestation verwendet. Somit benötigen diese Fahrzeuge nur eine Typ 2 Ladebuchse, welche sowohl für das Wechselstrom- als auch für das Gleichstromladen genutzt werden kann. Die Trennung der beiden Lademöglichkeiten erfolgt durch eine elektronische Umschaltung im Fahrzeug. Diese Schnellladestationen werden auch als „Tesla Supercharger“ bezeichnet und können daher nur von Tesla-Elektrofahrzeugen genutzt werden. [7] [79]

Abbildung 3-20 zeigt die in Europa verwendeten Typ-2- und CCS-Ladesteckdosen. Aufgrund der geringeren Batteriekapazitäten wird in Plug-in-Hybriden in der Regel eine Standard-Ladesteckdose des Typs 2 verwendet, die nur das Laden mit Wechselstrom ermöglicht. Bei rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen ist typischerweise die CCS-Ladebuchse als Ladeschnittstelle verbaut. Diese fahrzeugseitige Ladebuchse kann im Gegensatz zur CHAdeMO-Ladebuchse sowohl für das Laden mit Wechselstrom als auch für das Schnellladen mit Gleichstrom verwendet werden. Basierend auf der Typ 2 Ladesteckdose ist die CCS-Buchse um zwei dicke Gleichstrom-Leistungskontakte ergänzt, um das Laden mit Gleichstrom zu ermöglichen. Dabei kann der obere Teil der Ladebuchse weiterhin als Typ 2 Ladesteckdose für das ein- oder dreiphasige Wechselstromladen genutzt werden. [7] [72] [79]

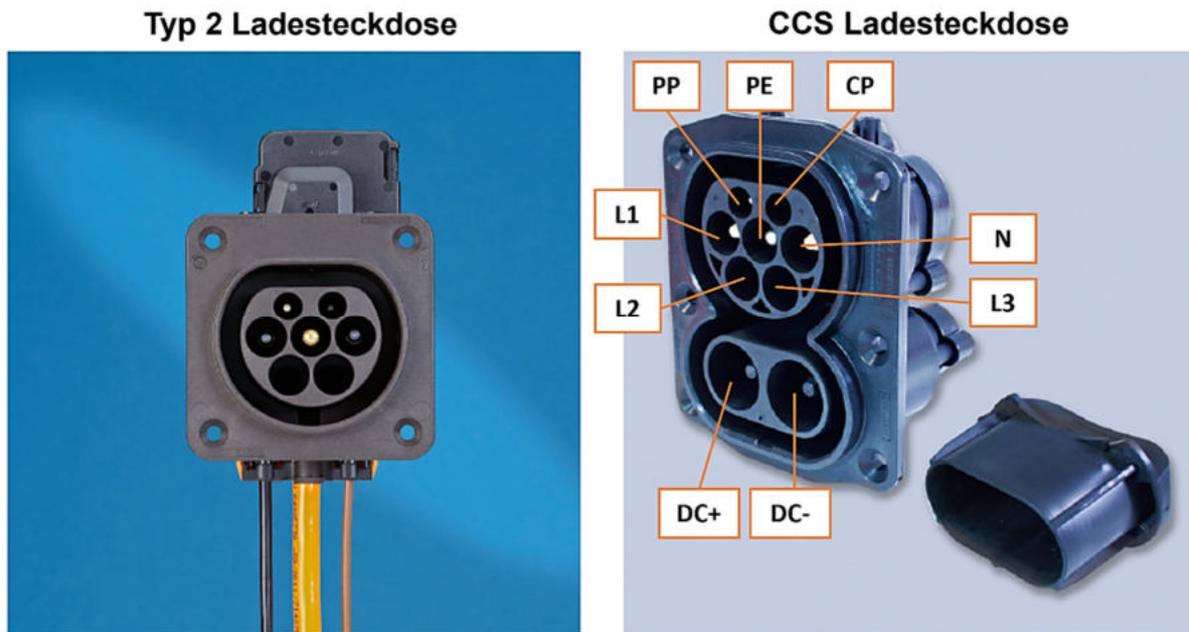


Abbildung 3-20: Typ 2 Ladesteckdose (links) und CCS-Ladesteckdose (rechts) [72]

Ausgeführtes Beispiel eines Ladesystems im Fahrzeug

Abbildung 3-21 zeigt ein ausgeführtes Ladesystem von einem batterieelektrisch betriebenen Fahrzeug. Das Hochvoltbatteriesystem kann grundsätzlich mit Wechsel- oder mit Gleichstrom über einen kombinierten Wechsel- und Gleichstrom-Ladestecker geladen werden. Im Privatumbfeld erfolgt das Aufladen der Batterie typischerweise mit Wechselstrom über den eigenen Stromanschluss mit einem Typ-2-Ladestecker.

Der Ladestecker ist mit einem Ladekabel entweder mit einer Wallbox oder einer mobilen Kommunikations- und Schutzeinrichtung verbunden. Diese übernimmt die Verbindung zur Netzinfrastruktur und ist nicht mit dem OnBoard-Ladegerät zu verwechseln, welches den Wechselstrom in Hochvolt-Gleichstrom verwandelt. Das OnBoard-Ladegerät ist flüssigkeitsgekühlt und mit einer Nennleistung von 11 kW ausgeführt. Es übernimmt bei diesem Fahrzeug als zusätzliche Funktion die Kommunikation mit der Ladeinfrastruktur für einen intelligenten Energieaustausch, wie beispielsweise das kostenoptimierte Laden mit Sonnenenergie einer Photovoltaik-Anlage oder das Laden bei kostengünstigen Stromtarifen. [51]

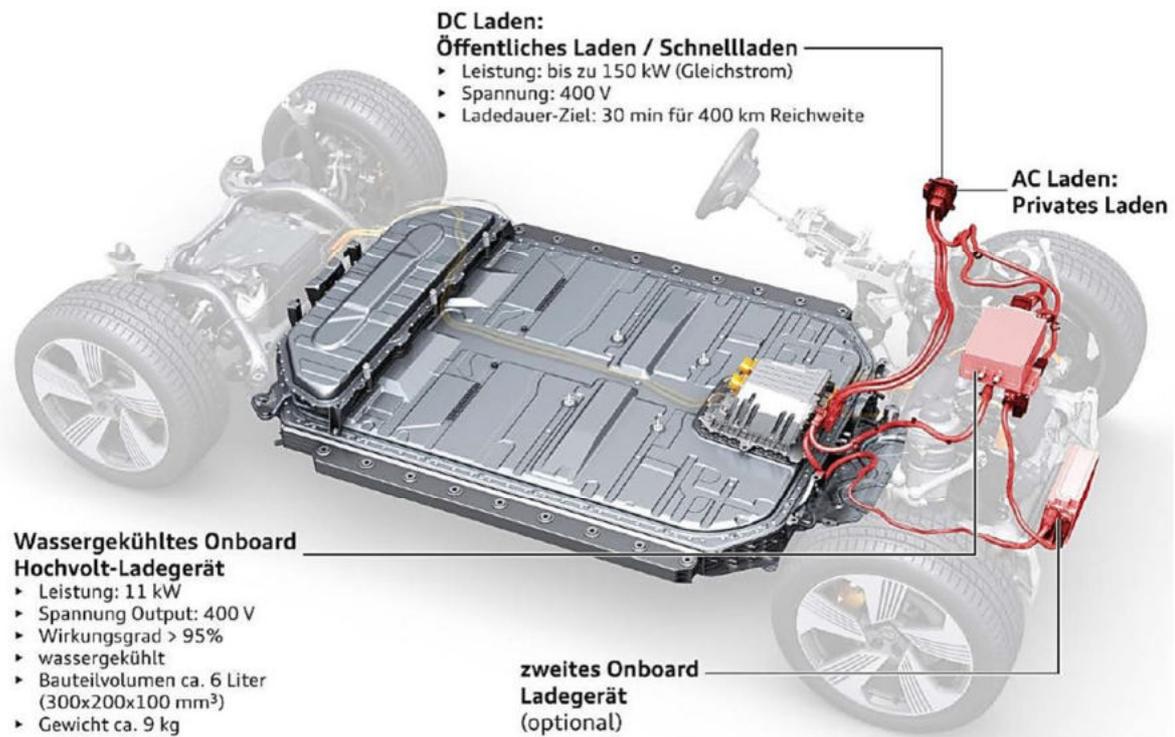


Abbildung 3-21: Ladetechnik einer ausgeführten Hochvoltbatterie des Audi e-tron [51]

Dieses Fahrzeug kann auch mit einem optionalen zweiten On-Board-Ladegerät ausgestattet werden, um die Wechselstrom-Ladeleistung von 11 auf 22 kW zu erhöhen. Somit kann die Ladezeit der Batterie an öffentlichen Wechselstrom-Ladestationen sowie bei ausreichender Ladeleistung im privaten Umfeld reduziert werden. [51]

Das gezeigte Fahrzeug kann an Schnellladestationen bei einer Spannung von 400 Volt direkt mit Gleichstrom geladen werden. Dies ermöglicht nach Herstellerangaben eine Ladezeit der HV-Batterie von 30-40 Minuten für eine Reichweite von bis zu 400 km. Während des Gleichstrom-Ladevorgangs wird die Batterie durch das Batteriemanagementsystem aktiv überwacht und gekühlt, und der Ladevorgang zeitlich gesteuert. [51]

Gleichstromladestation

Herkömmliche Schnellladestationen ermöglichen das Gleichstromladen bis zu einer maximalen Ladeleistung von 170 kW bei einer Spannung von 850 Volt und einer Stromstärke von 200 Ampere. Die notwendige Ladetechnologie, um Ladeleistungen von über 170 kW zu erreichen, ist bereits verfügbar.

Ab einer Ladestromstärke von 200 Ampere muss das Ladekabel inklusive Stecker gekühlt werden. Aus diesem Grund ist der Ladestecker in der Regel mit einem eigenen Kühlkreislauf erweitert, um den maximal zulässigen Ladestrom zu erhöhen, siehe Teilabbildung in der Mitte von Abbildung 3-22. [78]

Darüber hinaus erfordert das Laden mit hohen Ladespannungen und -strömen neue technische Lösungen in Bezug auf die Ladestation, das Ladekabel und die Ladetechnik des Elektrofahrzeugs. Das obere Teilbild aus Abbildung 3-22 zeigt schematisch eine Gleichstromladestation mit Energieversorgung sowie die zum Schnellladen benötigten Komponenten des Elektrofahrzeugs. Die zur Verfügung stehende Leistung der Stromversorgung ist dabei von einigen Faktoren abhängig. Zunächst

muss unterschieden werden, ob es sich um ein Niederspannungs-, ein Mittelspannungs-Wechselstromnetz oder um ein Gleichspannungsnetz handelt. Der jeweilige Zugang zum Stromnetz sowie die zum Zeitpunkt des Ladevorgangs verfügbare Leistung des Stromnetzes bestimmen im Wesentlichen die Ladeleistung an der Ladestation. [78] [81]

Die Leistung der Ladestation selbst hängt von der maximalen Eingangsleistung sowie von den technischen Bedingungen der Station ab, wie Größe, Gewicht und Temperaturregelung. Die maximal zulässige Ladeleistung der Ladekabel ist dabei ebenso von den technischen Bedingungen, wie Größe, Gewicht und maximaler Temperatur der Steckverbinder abhängig. [78]

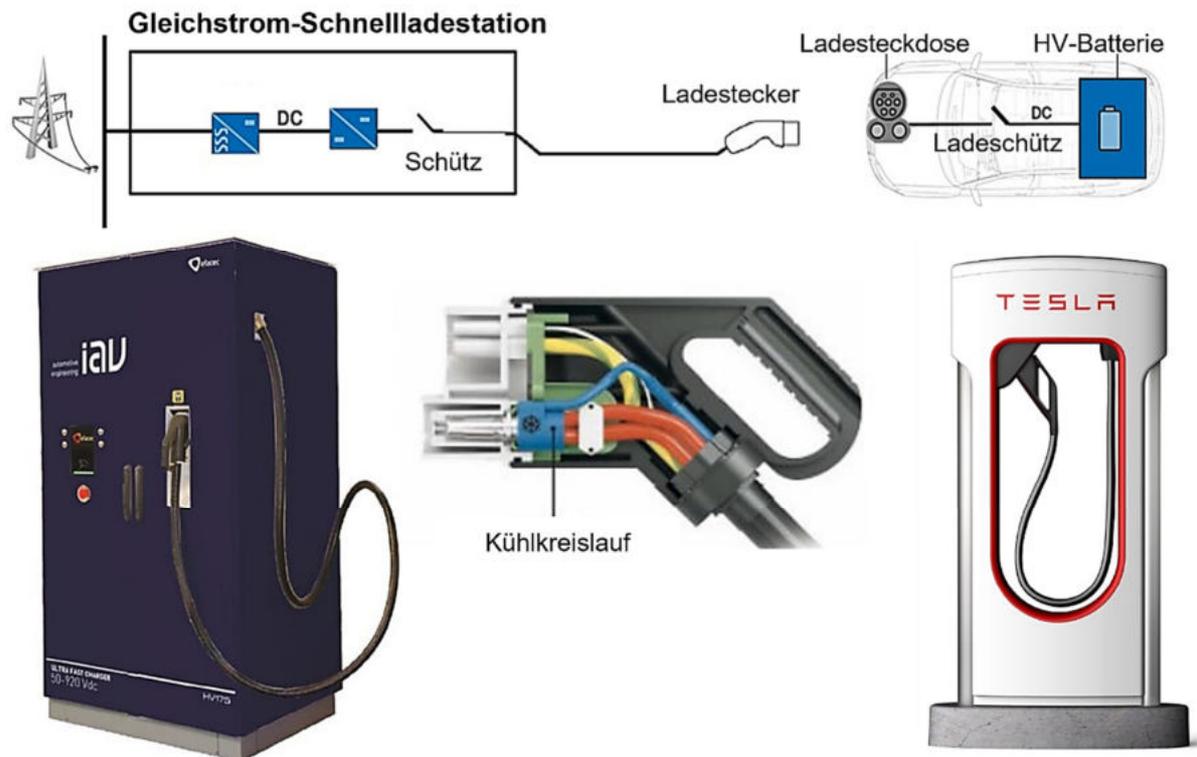


Abbildung 3-22: Schematische und ausgeführte Gleichstrom-Schnellladestationen mit gekühltem CCS-Ladestecker [78] [80]

In Abbildung 3-22 sind jeweils zwei ausgeführte Gleichstrom-Schnellladestationen ersichtlich. Das linke Teilbild zeigt eine Ladestation mit einem CCS-Ladestecker und einer Ladeleistung von bis zu 150 kW bei einem maximalen Ladestrom von 200 Ampere. Der rechte Bildausschnitt zeigt hingegen den Tesla Supercharger, der nur zum Schnellladen der Hochvoltbatterien für Tesla-Elektrofahrzeuge genutzt werden kann. Diese Ladestation bietet eine Leistung von 120 kW und ermöglicht je nach Batteriegröße einen Ladezustand der Tesla-Batterien von 80% in etwa 45 Minuten.

Aus der mehrphasigen Wechselspannung vom Stromnetz wird zunächst in der Ladestation eine Gleichspannung erzeugt. Zur Umformung wird in der Regel ein Gleichrichter verwendet. Anschließend wird in der Ladesäule die Gleichspannung mit einem Gleichstromsteller umgewandelt, sodass diese dem Wert der vom Fahrzeug angeforderten Ladespannung und Ladestrom entspricht. Die Gesamtspannung des Batteriesystems wird dabei durch die in Serie geschalteten Zellen bestimmt und der maximale Ladestrom wird durch die Anzahl der parallel geschalteten Stromkreise festgelegt. [78] [81]

A.Anhang

A.1 Hochvoltausbildung

Als Mindestanforderung für eine österreichweite Hochvoltausbildung an Fahrzeugen gilt die OVE-Richtlinie R19. Diese Richtlinie gilt für Unternehmen, die an Fahrzeugen mit Hochspannungsanlagen arbeiten, die mehr als 30V Wechselspannung oder mehr als 60V Gleichspannung aufweisen. Um ein sicheres Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen zu gewährleisten, muss daher ein spezielles Ausbildungsprogramm absolviert werden. Dieses Programm umfasst mehrere Stufen, die sowohl theoretische Inhalte als auch praktische Übungen enthalten. Unter Berücksichtigung der Tätigkeiten, die an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen durchgeführt werden können, werden die jeweiligen Ausbildungsstufen im Folgenden beschrieben. [85]

- **Ausbildungsstufe HV-0:**
Sensibilisierung für Personen im erstmaligen Umgang und der Bedienung von Fahrzeugen mit HV-System. Es dürfen Tätigkeiten, wie beispielsweise Reinigung, das Nachfüllen von Betriebsmitteln, die Nutzung bekannter Anschlüsse, die Benützung von Bedienelementen, das Betreten des Bereichs, aber außerhalb der Absperrung, indem Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystem durchgeführt werden.
- **Ausbildungsstufe HV-1:**
Allgemeine Systemkenntnisse und Tätigkeiten im spannungsfreien Zustand des HV-Systems. Es dürfen zusätzlich zu den Tätigkeiten von HV-0, Arbeiten am konventionellen 12V-Bordnetz durchgeführt werden. Darüber hinaus Nicht-elektrotechnische Arbeiten am Fahrzeug, wie beispielsweise Arbeiten an der Karosserie, Rad- und Ölwechsel sowie technische Fahrzeugüberprüfungen, wie zum Beispiel die §57a-Überprüfung. Es dürfen keine Tätigkeiten am HV-System oder Arbeiten in der Nähe von Hochvoltkomponenten durchgeführt werden, bei denen diese beschädigt werden können.
- **Ausbildungsstufe HV-2:**
Vertiefte Systemkenntnisse und Tätigkeiten am HV-System mit Spannungsfreischaltung. Zusätzlich zu den Tätigkeiten von HV-1 dürfen Messungen am HV-System durchgeführt werden, bei denen ein Berührungsschutz zwingend sichergestellt bleibt. Darüber hinaus dürfen Spannungsfreischaltungen mit Feststellung der Spannungsfreiheit sowie Tätigkeiten am Hochvoltssystem ausgeübt werden.
- **Ausbildungsstufe HV-3:**
Spezifische Systemkenntnisse für Tätigkeiten am HV-System und deren unter Spannung stehenden Bauteilen. Nach Qualifikation von HV-2 dürfen Arbeiten an elektrischen Energiespeichern sowie an Fahrzeugen mit beschädigten HV-Systemen durchgeführt werden. Es dürfen auch Messungen am HV-System zur Fehlereingrenzung und Prüfarbeiten ausgeführt werden, bei denen unter Spannung stehende Bauteile nicht zwingend gegen Berührung geschützt sind. Generell darf jede Arbeit durchgeführt werden, bei der das Berühren von nicht gegen Berührung geschützten Hochvoltkomponenten mit Gegenständen oder Körperteilen möglich ist.
- **Ausbildungsstufe HV-A:**

Aufbaustufe zu HV-1. Diese beinhaltet Tätigkeiten von HV-1 sowie zusätzlich Bergen, Verladen, Transport und Übergabe von Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen. Dies umfasst außerdem die Beurteilung der Gefahr, die von einem beschädigten HV-Fahrzeug ausgeht, und damit die Einschätzung der Transportfähigkeit des Fahrzeugs.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Hauptkomponenten von einem Batterie-Elektrischen-Fahrzeug – Beispielfahrzeug Audi e-tron [2]	6
Abbildung 1-2: Antriebsstrang-Architektur von einem allgemeinen Batterie-elektrischen-Fahrzeug [3]	7
Abbildung 1-3: Ausführungen von Antriebsarchitekturen von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen [4].....	8
Abbildung 1-4: Ausgeführtes achsparalleles elektrisches Achsantriebssystem - eVD2 von ZF [5]	8
Abbildung 1-5: Vorderachse des BMW i8 mit Elektromaschine und 2-Gang-Getriebe [6].....	9
Abbildung 1-6: Ausgeführter Radenabenantrieb der eWheel Drive von Schaeffler [7]	10
Abbildung 1-7: (a) Conversion Design links: VW e-Golf und (b) Purpose Design rechts: VW MEB-Plattform [9]	11
Abbildung 1-8: Elektrischer Antriebstrang vom VW e-Golf als Conversion Design [10]	12
Abbildung 1-9: Elektrische Achsantriebseinheit vom VW e-Golf [10].....	13
Abbildung 1-10: Das Hochvoltbatteriesystem des VW e-Golfs [10]	14
Abbildung 1-11: MEB-Plattform von Volkswagen als Purpose Design [10]	15
Abbildung 1-12: Aufbau Hinterachsenantrieb der MEB-Plattform von Volkswagen [11]	16
Abbildung 1-13: Fahrzeugarchitektur vom VW ID.4 [12]	17
Abbildung 1-14: Fahrzeugarchitektur mit vier Radnabenmotoren [13]	18
Abbildung 1-15: Hauptkomponenten von einem Brennstoffzellenfahrzeug– Beispielfahrzeug Toyota Mirai I [33]	19
Abbildung 1-16: Brennstoffzellensystem – Beispielsystem vom Hyundai Nexa [34]	21
Abbildung 1-17: Antriebsstrang mit dominanten Brennstoffzellenantrieb [33].....	22
Abbildung 1-18: Antriebsstrang mit Range-Extender Brennstoffzellenantrieb [33].....	23
Abbildung 1-19: Fahrzeugarchitektur mit dominanten Brennstoffzellenantrieb – Hyundai ix35 FCEV [33] [35]	24
Abbildung 1-20: Antriebstrang von einem Brennstoffzellen Plug-In-Hybridfahrzeug – Mercedes GLC F-Cell [36].....	25
Abbildung 1-21: Fahrzeugaufbau Brennstoffzellenbus - Van Hool A330 Fuel Cell Hybrid [37]	26
Abbildung 1-22: Prinzip der Lastpunktverschiebung (a) und Auswirkung auf die Effizienz (b) [16]	29
Abbildung 1-23: Basisantriebsarchitekturen in Bezug auf den Leistungsfluss von Hybridfahrzeugen [15]	30
Abbildung 1-24: Definitionen für Parallel-Hybridantriebssysteme zur Positionierung der E-Maschine [7]	32
Abbildung 1-25: Aufbau eines allgemeinen Planetengetriebes mit Abstraktion [17]	34
Abbildung 1-26: Schematische Darstellung eines leistungsverzweigten Hybridgetriebes (One-Mode) von Toyota [7]	35
Abbildung 1-27: Übersicht der gebräuchlichsten Kombinationen von Hybridarchitekturen und Elektrifizierungsgrade mit Übersicht der Grundfunktionen.....	36
Abbildung 1-28: Vergleich Start-Stopp-System und Micro-Hybridantriebssystem [7]	38
Abbildung 1-29: Mild-Hybridantriebssystem – Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7]	39
Abbildung 1-30: Full-Hybridantriebssystem – Typische P2-Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7].....	40
Abbildung 1-31: Plug-In-Antriebssystem – Typische P2-Anordnung der Komponenten und elektrischer Aufbau [7].....	41

Abbildung 1-32: Ausführung eines Elektrofahrzeugs mit Reichweitenverlängerung - BMW i3 mit Range Extender [18] [19].....	43
Abbildung 1-33: Ausführung Range-Extender-Einheit mit Wankelmotor im Gesamtsystem [20]	44
Abbildung 1-34: Schematische Darstellung des 48-Volt Mild-Hybrid-Gesamtsystem in P0-Konfiguration – Beispiel Volkswagen Golf 8 [21]	45
Abbildung 1-35: Komponenten des 48V-Mild-Hybridsystems mit Riemen-Startergenerator-Einheit [21]	45
Abbildung 1-36:Antriebsaggregat mit 48V-Komponenten und schematische Darstellung vom P1-Mildhybridsystem [22]	47
Abbildung 1-37: Ausführungsbeispiel eines 48-Volt-Mildhybridsystem mit ISG vom Mercedes M256 [23]	48
Abbildung 1-38: Architektur eines Voll-Hybridantriebssystems in P2-Anordnung – Beispiel Audi Q5 Hybrid quattro [7] [24]	50
Abbildung 1-39: Aufbau des Hybridmoduls mit Komponenten – Beispiel Audi Q5 Hybrid quattro [7] [24]	50
Abbildung 1-40: Architektur eines Voll-Hybridantriebssystem in P4-Anordnung – Beispiel Peugeot 3008 Hybrid4 [25] [26]	51
Abbildung 1-41: Antriebsstrang eines leistungsverzweigten Vollhybridfahrzeugs – Beispiel Toyota Prius IV [27]	53
Abbildung 1-42: Ausgeführtes Antriebssystem mit Hybridgetriebe vom Toyota Prius IV [28].....	55
Abbildung 1-43: Fahrzeugarchitektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P2-Konfiguration – Beispiel Mercedes Kompaktklasse [29].....	56
Abbildung 1-44: Achtgang-Doppelkupplungsgetriebe mit integriertem Hybridmodul [29].....	57
Abbildung 1-45: Architektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P2-Konfiguration – Beispiel BMW X5 eDrive [30].....	58
Abbildung 1-46: Acht-Gang-Automatikgetriebe mit integriertem Hybridmodul [30]	58
Abbildung 1-47: Architektur von einem Plug-In-Hybridfahrzeug mit P3-Konfiguration – Beispiel Mercedes AMG [86]	59
Abbildung 2-1: Vergleich von ausgewählten Batterien und Kondensatoren [38]	63
Abbildung 2-2: Prinzipieller Aufbau und elektrochemische Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle [14]	65
Abbildung 2-3: Entladekurven einer Lithium-Ionen-Batterie [38]	67
Abbildung 2-4: Spezifische Kapazität und Spannung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien [40]....	68
Abbildung 2-5: Hauptausführungen von Lithium-Ionen-Zellen im Schichtaufbauverfahren [39]	70
Abbildung 2-6: Konstruktiver Aufbau von einer zylindrischen- und einer Pouch-Zelle [42].....	72
Abbildung 2-7: Maße prismatischer- und Pouch-Zellen für automobiler Anwendungen nach VDA-Richtlinien [44]	73
Abbildung 2-8: Grundlegender Aufbau einer Traktionsbatterie eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs von Audi [46].....	74
Abbildung 2-9: schematischer Aufbau eines Hochvolt-Batteriesystems [47].....	75
Abbildung 2-10: Mild-Hybrid-Serienanwendung einer Li-Ionen-Batterie von Mercedes Benz in Blockbauweise (links) Batteriemodul mit zwölf Pouch-Zellen von Audi (rechts) [32] [46].....	76
Abbildung 2-11: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung eines Lithium-Ionen-Batteriesystems [39]	80
Abbildung 2-12: Batteriesystem des BMW i3 der ersten Generation [48]	85
Abbildung 2-13: Fahrzeugarchitektur des Tesla Model 3 mit Batteriesystem im Unterboden (rot markiert) [49]	86

Abbildung 2-14: Batteriemodule des Tesla Model 3 [50]	86
Abbildung 2-15: Schnittmodell der Hochvolt-Batteriesystems des Audi e-tron [51]	87
Abbildung 2-16: Aufbau der Hochvoltbatterie des VW-Golfs Plug-In Hybrid [52].....	88
Abbildung 2-17: Prinzipieller äußerer Aufbau einer elektrischen Maschine [32].....	90
Abbildung 2-18: Unterteilung von Elektromaschinen nach Maschinenart [14].....	91
Abbildung 2-19: Allgemeine Betriebskennlinien für elektrische Maschinen [7].....	92
Abbildung 2-20: Idealierte stationäre Zustandskennlinie einer Asynchronmaschine [14]	93
Abbildung 2-21: Prinzipieller innerer Aufbau einer PSM mit Innenläufer und ASM mit Kurzschlussläufer [14]	94
Abbildung 2-22: Aufbau des Stators der PSM (links) und Phasenordnung im Stator (rechts) [11] ..	98
Abbildung 2-23: Aufbau vom Rotor der PSM [11].....	98
Abbildung 2-24: Komponenten am B-Lagerschild der PSM [11].....	99
Abbildung 2-25: Wirkungsgradkennfeld einer permanenterregten Synchronmaschine [11]	100
Abbildung 2-26: Aufbau des Stators einer Asynchronmaschine [63].....	101
Abbildung 2-27: Montierter Rotor mit Koaxialwelle und Lager (oben) und Explosionsdarstellung der Rotorkomponenten (unten) einer ASM [63].....	102
Abbildung 2-28: Wirkungsgradkennfeld einer Asynchronmaschine [63]	102
Abbildung 2-29: Möglichkeiten der Umformung mit verschiedenen Stromrichtern [14]	103
Abbildung 2-30: Beispiel für die schematische Verschaltung von Stromrichtern für Elektro- und Hybridfahrzeuge [7].....	104
Abbildung 2-31: Schematische Ausgangsspannung einer Phase mit sinusförmigem Verlauf [15]	105
Abbildung 2-32: Prinzip-Schaltbild eines Brückenzeigs als Gleichstromsteller [15].....	105
Abbildung 2-33: Dreiphasige Brückenschaltung (links) mit IGBT-Modul (rechts) [7] [32]	106
Abbildung 2-34: Prinzip-Schaltbilder von einem MOSFET (links), einem IGBT (mitte) und Diode (rechts) [15]	107
Abbildung 2-35: Prinzipdarstellung einer Leistungselektronik eines elektrischen Antriebssystems [7]	108
Abbildung 2-36: Aufbau der Leistungselektronik des Audi e-trons [46].....	109
Abbildung 2-37: Aufbau der Leistungselektronik der MEB-Plattform von VW (links) und des BMW i3 (rechts) [11] [48].....	110
Abbildung 2-38: Drehmoment- und Leistungskennlinien einer PSM in Verbindung mit einem 2-Gang-Getriebe [14]	111
Abbildung 2-39: Ein-Gang-Stirnradgetriebe in koaxialer Ausführung von Volkswagen [63]	112
Abbildung 2-40: Achsgetriebe in achsparalleler (links) und koaxialer (rechts) Ausführung von Audi [46]	113
Abbildung 2-41: Aufbau des schaltbaren Zwei-Ganggetriebes der elektrischen Antriebsachse des BMW i8 [6] [65]	114
Abbildung 2-42: Aufbau eines Achtgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe von ZF und Porsche [14]	116
Abbildung 2-43: Aufbau Sechsgang-Hybrid-Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen [64]	116
Abbildung 2-44: Aufbau eines 8-Gang-Hybrid-Automatikgetriebes von ZF und Porsche [14]	117
Abbildung 2-45: Automatisiertes Handschaltgetriebe mit elektrischer Maschine für schwere Nutzfahrzeuge [7].....	118
Abbildung 2-46: Aufbau Two-Mode Hybridgetriebe mit zwei Arten der Leistungsverzweigung [14] [32]	119
Abbildung 2-47: Schematische Darstellung der leistungsverzweigten Antriebseinheit von Voltec 1.Generation [7]	120

Abbildung 2-48: Das Antriebssystem von Voltec – 1.Generation (links) und 2.Generation (rechts) [66] [67]	121
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Zwei-Spannungsbordnetz mit 12- und 48-Volt [68] [69]	124
Abbildung 3-2: Bordnetzarchitektur von einem Hochleistungs-Elektrofahrzeug mit 800V-Spannung [70]	125
Abbildung 3-3: Beispielausführung einer Leistungsverteiler-Einheit [71]	126
Abbildung 3-4: Schematischer Aufbau einadrig und mehradrig geschirmter Hochvoltleitungen [69] [73]	128
Abbildung 3-5: HV-Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung (links), verschiedene HV-Steckverbinder (Mitte) und Dreiphasenstecker für Wechselstromladen (rechts) [39] [72]	129
Abbildung 3-6: Finger-Berührungsschutz (links) und HV-Steckverbinder mit Signalkontaktanschluss (rechts) [39] [69].....	129
Abbildung 3-7: Service-Trennschalter mit Vorhängeschloss (links) und Warnschild (rechts) [69]	130
Abbildung 3-8: Schematisches HV-Bordnetz mit Anordnung der Hauptschütze und Vorladerelais [39] [69]	131
Abbildung 3-9: Grundsätzlicher Aufbau eines Steuergerätes [57].....	133
Abbildung 3-10: Ausführungsbeispiel von einem Thermomanagementsystems des Audi Q4 50 e-tron quattro [74]	135
Abbildung 3-11: Methoden der Zellkühlung: (a) Luftkühlung, (b) Bodenkühlung, (c) passive Seitenkühlung, (d) aktive Seitenkühlung, (e) Ableiterkühlung [39]	137
Abbildung 3-12: Schematische Darstellung der Batterie-Kühlkonzepte: mit Luft (a), mit Kältemittel direkt (b), mit Kühlflüssigkeit in einem Sekundärkreislauf (c) [39]	139
Abbildung 3-13: Kühlung der Hochvolt-Batterie über den Chiller [75].....	141
Abbildung 3-14: Ausgeführte Kühlungsvarianten: Luftkühlung (links) und Flüssigkeitskühlung (rechts) [7] [46]	141
Abbildung 3-15: Kühlmitteldurchfluss durch Leistungselektronik und Kühlkanäle des Stators einer PSM (links) und kombinierte Kühlmittel und Ölkühlung einer ASM (rechts) [11] [63]	143
Abbildung 3-16: Ölkühlung des Rotors und der Kupferwicklungen des Stators einer ASM [63].....	144
Abbildung 3-17: Kühlsysteme von zwei elektrischen Achsantrieben mit Lagerschild- und Rotorinnenkühlung [51]	145
Abbildung 3-18: Vergleich von Ladezeiten in Abhängigkeit von verschiedenen Ladeleistungen [14]	147
Abbildung 3-19: Ladeverhalten einer Lithium-Ionen-Batteriezelle [82]	148
Abbildung 3-20: Typ 2 Ladesteckdose (links) und CCS-Ladesteckdose (rechts) [72]	151
Abbildung 3-21: Ladetechnik einer ausgeführten Hochvoltbatterie des Audi e-tron [51]	152
Abbildung 3-22: Schematische und ausgeführte Gleichstrom-Schnellladestationen mit gekühltem CCS-Ladestecker [78] [80].....	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Unterteilung Hybridantriebe nach Elektrifizierungsgrad, Spannungsniveau und Batteriekapazität [7].....	37
Tabelle 2-1 : Arbeitsspannung, Kapazität und Energiedichte von Zellen mit negativer Graphitelektrode und häufige Materialien für positive Elektroden [39].....	69
Tabelle 2-2: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der gängigen Zelltypen [43]	72
Tabelle 2-3: Vergleich verschiedener Zelltypenausführungen hinsichtlich relevanter Kenngrößen [45]	73
Tabelle 2-4: Temperaturphasen des Thermal-Runaways und seine Folgen [42].....	82
Tabelle 2-5: Übersicht der gasförmigen Verbrennungsprodukte bei Selbstzerstörung der Batteriezelle [42]	83
Tabelle 2-6: Missbrauchstests für Batteriesysteme zur Typengenehmigung [56].....	84
Tabelle 2-7: Vergleich von spezifischen Kenngrößen der Batteriesystem der ausgewählten Fahrzeuge [45]	85
Tabelle 2-8: Leistungsmerkmale von ausgewählten elektrischen Maschinen [7] [58] [59].....	95
Tabelle 2-9: Bewertungsmatrix von ausgewählten elektrischen Maschinen [7] [61].....	96
Tabelle 2-10: Schaltmatrix des Two-Mode-Hybridgetriebes für unterschiedliche Betriebsmodi [32]	119
Tabelle 2-11: Betriebsmodi und Kupplungsschaltstellungen des Voltec-Antriebssystems (1.Generation) [7]	120
Tabelle 3-1: Übersicht von typischen Bordnetz-Spannungslagen für elektrifizierte Antriebssysteme [7]	123
Tabelle 3-2: Anforderungen und Temperaturbereiche der Komponenten in einem Thermomanagementsystem [52].....	134
Tabelle 3-3: Lademöglichkeiten für Batteriesysteme mit Ladeleistungen und Ladezeiten [76].....	146
Tabelle 3-4: Vergleich von unterschiedlichen Ladesteckern in Europa mit deren maximalen Spannungen, Ladeströme und Ladeleistungen [78].....	149
Tabelle 3-5: Belegungsoptionen von ausgewählten Ladesteckern mit Pins und Funktionen [79]	150

Literaturverzeichnis

- [1] Statistik Austria: PKW-Neuzulassungen in Österreich nach Kraftstoffarten bzw. Energiequelle von Januar bis November 2021 (und Vergleich zum Vorjahr), Erhebung durch VVO, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/734328/umfrage/pkw-neuzulassungen-in-oesterreich-nach-kraftstoffarten-bzw-energiequelle/>
- [2] Doerr, J.: Das elektrische Antriebssystem mit 3-Motor-Layout im neuen Audi e-tron Top-Modell. Wiener Motorensymposium, 2020.
- [3] Gächter, J., Fabian, J., Hirz, M., Schmidhofer, A., Lanzenberger, H.: Evaluation of angular Sensor Systems for Rotor Position Sensing of Automotive Electric Drive. In: Fischer-Wolfrath, J., Meyer, G.: Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springer, Cham, ISBN 978-3-319-08086-4, 2014.

- [4] Uerlich, R., Köller, S., Witham, G., Eckstein, L.: Concept ELV – Design of an Electric Drive Axle for Heavy Distribution Traffic. 30.Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2021.
- [5] ZF Friedrichshafen AG: Mit E-Mobilität in die Zukunft – ZF-Produkte für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. https://www.zf.com/products/de/cars/products_29296.html, 2015.
- [6] BMW Group: BMW i8 Frontbereich. ID: P90130610, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0144439EN/the-bmw-i8-selected-chapters?language=en>, 2013.
- [7] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge-Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft 2. Auflage, Springer Verlag Wien, ISBN 978-3-7091-1779-8, 2014.
- [8] Geulen, G., Eckstein, L.: Elektrischer Antrieb – Conversion Design versus Neuentwicklung. 2012.
- [9] Busse, A., Spohr, S., Witham, G., Hensen, J., Thirunavukkarasu, D., Eckstein, L.: Holistic Evaluation of Components and Systems for Electrified Vehicles – Life Cycle Assessment as a Decisive Factor in the Innovation and Development Process. 30.Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2021.
- [10] Eichler, F., Bennewitz, K., Helbing, C., Philipp, K., Lück, P., Weiß, N., Felsch, C.: Volkswagen elektrifiziert den neuen Golf. 38. Internationales Wiener Motorensymposium, 2017.
- [11] Blumenröder, K., Bennewitz, K., Lück, P., Touse, J., Estorf, M.: Der neue Modulare E-Antriebs-Baukasten von Volkswagen. 40. Internationales Wiener Motorensymposium, 2019.
- [12] Helbing, C., Bennewitz, K., Lück, P., Touse, J., Peter, J.: Das Antriebsportfolio des MEB von Volkswagen. 42. Internationale Wiener Motorensymposium, 2021.
- [13] Hilton, C.: ProteanDrive: ein digitales Antriebssystem in den Rädern. 39. Internationales Wiener Motorensymposium, 2018.
- [14] Merker, G.P., Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren–Funktionsweise und alternative Antriebssysteme, Verbrennung, Messtechnik und Simulation. 9.Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3-658-23556-7, 2019.
- [15] Tschöke, H., Gutzmer, P., Pfund, T.: Elektrifizierung des Antriebsstrangs-Grundlagen – vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb. Springer Vieweg Berlin, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3-662-60355-0, 2019.
- [16] Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Pollak B.: Das Getriebebuch. 2.Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-13103-6, 2016.
- [17] Hick, H., Faber, F.: Maschinenelemente II-Vorlesungsfolien. Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, TU Graz, 2018.

- [18] BMW Group: BMW i3 mit Range Extender. ID: P90129296
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90129298/bmw-i3-mit-range-extender-07/2013>, 2013.
- [19] BMW Group: BMW i3 mit Range Extender. ID: P90129298
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90129298/bmw-i3-mit-range-extender-07/2013>, 2013.
- [20] Fischer R., Fraidl G., Hubmann C., Kapus P., Kunzemann R., Sifferlinger B., Beste F.: Range - Extender-Modul – Wegbereiter für elektrische Mobilität. MTZ 70, 2009.
- [21] Zillmer, M., Bennewitz, K., Blumenröder, K., Mann, A., Voeltz, T., Dick, V.: Das 48V-Mild-Hybrid-Antriebssystem des Volkswagen Golf – Auslegung und Steuerung. 40. Internationales Wiener Motorensymposium, 2019.
- [22] Eder, T., Keller, U., Merdes, N.: Der modulare High-Tect-Powertrain von Mercedes-Benz. 38. Internationales Wiener Motorensymposium, 2017.
- [23] Vollrath, O., Banken, J., Lautenschütz, P., Storz, O.: M 256 – Der neue Mercedes-Benz High Performance Reihensechszylinder Ottomotor mit intelligenter 48V-Elektrifizierung. 38. Internationales Wiener Motorensymposium, 2017.
- [24] N.N.: Der Audi Q5 hybrid Quattro. AUDI AG Kommunikation Produkt und Technologie, Basisinfo Q5 hybrid 0[1].pdf, www.audi-mediaservices.com, 2011.
- [25] Peugeot 3008 HYbrid4-Bedienungsanleitung. AL. 11388.H020.
https://service.citroen.com/secours/PDF/Rescue_Manual_HYbrid4_TT.pdf, 2012.
- [26] Green Car Congress: Peugeot 3008 HYbrid4 diesel-electric crossover now on sale; limited edition sold out. <https://www.greencarcongress.com/2011/09/3008-20110908.html>, 2011.
- [27] Toyota: Fourth-generation Prius 2015-. <https://global.toyota/en/prius20th/evolution/4th/>, 2017.
- [28] Green Car Congress: Toyota details powertrain advances in Gen4 Prius; available E-Four system for all-wheel drive (not for US). <https://www.greencarcongress.com/2015/10/20151013-prius.html>, 2015.
- [29] Gödecke, T., Ascher, F., Dickgießer, D., Engbroks, L., Schürmann, T., Voigtländer, R.: EQ Power Plug-In Hybrid – Elektrifiziert von A bis S. 40. Internationales Wiener Motorensymposium, 2019.
- [30] Meinert, H., Senger, T., Wiebking, N., Diegelmann, C.: The Plug-In Hybrid Technology of the New BMW X5 eDrive. MTZ 76, 2015.

- [31] Ardey, Bolling, Juraschek, S., Klueting, Landerl: Plug and Drive – Das neue Plug-In-Hybridsystem von BMW. 36. Internationales Wiener Motorensymposium, 2015.
- [32] Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K.: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Springer Fachmedien Wiesbaden, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3-8348-0722-9, 2012.
- [33] Klell, M., Eichelseder, H., Trattner, A.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik - Erzeugung, Speicherung, Anwendung. 4.Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3-658-20446-4, 2018.
- [34] Zubel, M., Walters, M., Schmitz, M., Pischinger, S.: Fuel Cell Freeze Start-From Simulation and Benchmarking to System Optimization. 30. Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2021.
- [35] Emergency Response Guide – ix35 FCEV. Hyundai Motor Company. https://h2tools.org/sites/default/files/ix35%20FCEV%20ERG_Eng.pdf, 2013.
- [36] Dehn, S., Mohrdick, C.: The New Mercedes-Benz Fuel Cell Plug-in-Hybrid Drive. 27. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2018.
- [37] Van Hecke, G.: Van Hool – Fuel Cell Electric Bus. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/7_presentation_van_hool.pdf, 2018.
- [38] Kurzweil, P., Dietlmeier, O.: Elektrochemische Speicher - Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen. 2. Auflage, Springer-Vieweg, ISBN 978-3-658-21828-7, 2018.
- [39] Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Verlag Berlin, ISBN 978-3-642-30652-5, 2013.
- [40] Jossen, A.: Forschung und Entwicklung von mobilen Batteriesystemen. E-Motion-Days, Innsbruck, 20.-21.10.2016, 2016.
- [41] Sterner, M., Stadler, I.: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin, ISBN 978-3-662-48892-8, 2017.
- [42] Sojka, R.: Sichere Aufbereitung von Lithium-basierten Batterien durch thermische Konditionierung – Recycling und Sekundärrohstoffe. Band 13, Thomé-Kozmiensky Verlag Neuruppin, ISBN 978-3-944310-51-0, 2020.
- [43] Dorrman, L., Sann-Ferro, K., Heininger, P., Mähliß, J.: Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen. VDE-Studie, <https://www.dke.de/resource/blob/933404/dd44d15918ce4d4aefc363a4ef1490e1/kompendium-li-io-batterien-2021-de-data.pdf>, 2021.

- [44] Lamm, A.: Entwicklungen auf dem Batteriesektor aus Sicht eines Automobilherstellers: Lithium-Ionen-Batterien – Chancen und Risiken für die Region Stuttgart. Stuttgart, 2012.
- [45] Pröll, A.: Multimaterialkonzept für modulare, strukturintegrierte Traktionsbatterien. Dissertation, Johannes-Kepler-Universität Linz, 2020.
- [46] Arday, N.: Das elektrische Antriebssystem im neuen Audi e-tron. 39. Internationales Motorensymposium, 2018.
- [47] Homann, J., Reimer, E.: Design Trends for Lithium-Ion Battery Modules – Cost Reduction via Function Integration. 26. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2017.
- [48] Juraschek, S.: Born Electric – Concept and Innovative Electric Drivetrain of the New BMW i3. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2013.
- [49] Tesla Model 3 Emergency Response Guide, www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Guide_def, Zugriff am 18.01.2022.
- [50] Tesla Model 3 Battery Pack Modules. <https://electrek.co/2017/08/24/tesla-model-3-exclusive-battery-pack-architecture/>, Zugriff am 18.01.2022.
- [51] Pint, S., Ardey, N., Mendl, G., Fröhlich, G., Straßer, R., Laudenschlager, T., Doerr, J.: Das neue vollelektrische Antriebssystem von Audi. 39. Internationales Wiener Motorensymposium, 2018.
- [52] Philipp, K., Jelden, H., Neußer, H.-J.: Der elektrifizierte Antriebsstrang des Volkswagen Golf Plug-In Hybrid. 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013.
- [53] Sinz, W., Feist, F. et al.: Concept for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries, SAE Paper doi: 10.4271/2012-01-0124, 2012.
- [54] Buser, M., Mähliß, J.: Lithiumbatterien, Brandgefahren und Risiken, Version 1 –April / 2016, Risk Experts Engineering GmbH und Batteryuniversity GmbH, 2016.
- [55] Lammer, M., Königseder, A., Meyer, K., Lux, S., Hacker, V.: Untersuchung zur Entstehung brennbarer Gase beim Recycling von Li-Ionen Batterien. Konferenzbeitrag 13. Recy & DepoTech-Konferenz an der Montanuniversität, Leoben, 2016.
- [56] Kampker, A., Heimes, H., Wessel, S.: Prüfen von Lithium-Ionen-Batterien – Testen nach Standards: ECE R100, ECE R136, UN T 38.3, Url: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaxihha, 2017.
- [57] Borgeest, K.: Elektronik in der Fahrzeugtechnik – Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement. 4.Auflage, Springer-Fachmedien Wiesbaden, ATZ/MTZ-Fachbuch, ISBN 978-3-658-23663-2, 2021.

- [58] Graaf, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen, 2000.
- [59] Langer, U.; Schmidt, M.; Sellinger, R.: Entwicklungspotenzial bei und Einsatzmöglichkeiten von alternativen Antriebskonzepten im OPNV. Studie am Lehrgebiet FMU an der FH Köln in Zusammenarbeit mit dem VDV, 1998.
- [60] Schäfer, H.: Magnetlose elektrische Maschinen, gekennzeichnet durch eine hohe Materialverfügbarkeit und deshalb prädestiniert für den breitflächigen Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. 35. Internationales Wiener Motorensymposium, 2014.
- [61] Neudorfer, H.: Elektrische Antriebe in Fahrzeugen – die Lösung für die Zukunft? Vorlesungsfolien Technische Universität Darmstadt, Traktionssysteme Austria, 2009.
- [62] Teigelkötter, J.: Energieeffiziente elektrische Antriebe – Grundlagen, Leistungselektronik, Betriebsverhalten und Regelung von Drehstrommotoren. Springer-Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1938-3, 2013.
- [63] Helbing, C., Bennewitz, K., Lück, P., Tosen, J., Peter, J.: Das Antriebsportfolio des MEB von Volkswagen. 42. Internationale Wiener Motorensymposium, 2021.
- [64] Volkswagen AG, Porsche Holding: Der Plug-In-Hybrid-Antrieb im MQB – DQ400E. <https://www.porscheholding-newsroom.at/stories/default-5e6f794088>, 2021.
- [65] Green Car Congress – GKN develops two-speed eAxe; in production on BMW i8. <https://www.greencarcongress.com/2014/11/20141110-gkn.html>, 2014.
- [66] Grebe, U., Nitz, L.: Voltec – Das Antriebssystem für Chevrolet Volt und Opel Ampera. Springer Professional, MTZ-Motortechnische Zeitschrift Ausgabe 5, 2011.
- [67] Nitz, L.: E-motional electrified vehicles – the 2 gen Voltec drive system. 14. CTI Symposium Transmissions, HEV and EV Drives, Berlin, 2015.
- [68] Hakvoort, H., Olbrich, T.: Serienapplikation eines 48-V-Hybridantriebs. <https://www.springerprofessional.de/serienapplikation-eines-48-v-hybridantriebs/14221694>, MTZ 9,2017.
- [69] Babel, G.: Bordnetze und Powermanagement – Thermische Modellbildung für elektrische und elektronische Bauelemente. 2.Auflage, Springer-Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-21142-4, 2019.
- [70] Bitsche, O.: Porsche Taycan, 800V Technologie für hochperformantes Laden und Fahren. 41. Internationales Wiener Motorensymposium, 2020.
- [71] Vickers, K., Senter, R., Nicholas, M.: High Voltage Battery and Power Distribution Technology. Workstream 4 Leader, 2011.

- [72] Fischer, H.-M.: Spannungsklassen in der Elektromobilität. ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/januar/Spannungsklassen_in_der_Elektromobilitaet/Spannungsklassen-Elektromobilitaet.pdf, 2013.
- [73] Kalb, H., Frommberger, M.: Entwicklung von HV-Leitungssätzen und deren Serienprüfung. LEONI Kabel GmbH und LEONI Bordnetzsysteme GmbH, <https://silo.tips/download/entwicklung-von-hv-leitungsstzen-und-deren-serienprfung>, 2017.
- [74] Audi AG: Audi Q4 50 e-tron quattro – Thermomanagement. <https://www.audi-mediacycenter.com/de/fotos/album/audi-q4-e-tron-1839>, Bild-Nr: A212064, 2021.
- [75] Audi AG: Audi Q4 50 e-tron quattro – Kühlung der HV-Batterie über den Chiller. <https://www.audi-mediacycenter.com/de/fotos/album/audi-q4-e-tron-1839>, Bild-Nr: A212067, 2021.
- [76] März, M.: Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang. Vorlesungsfolien Wintersemester 2020/21, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [77] Reber, V.: Neue Möglichkeiten durch Laden mit 800 V. Porsche Engineering Magazin 01 2016, Seite 10-15, 2016.
- [78] Willrett, U.: Future Generation for DC Fast - Challenges and approach for potential solutions, OEVK-Vortragsreihe 2016/2017, TU Graz 2016.
- [79] Creative Commons, Belegungsoptionen von Ladestecker, nicht kommerziell, Zugriff am 10.03.2022, <https://www.goingelectric.de/wiki/Ladung-und-Ladestecker/>
- [80] Tesla Österreich: Tesla Supercharger Ladestation. Zugriff am 10.03.2022, https://www.tesla.com/de_AT/supercharger.
- [81] Willrett, U.: Grid integration e-mobility – Developments and challenges. 19. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik, 2019.
- [82] Battery University: BU-409: Charging Lithium-ion. <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>, 2021.
- [83] VDI- /VDE-Studie: Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung der Elektromobilität. <https://www.vde.com/resource/blob/1927182/ebf217d10a1fd89769029fc2cb54d252/elektromobilitaet-studie-data.pdf>, 2019.
- [84] Digitaler-Atlas - GIS-Steiermark, Zugriff am 07.04.2022. <https://gis.stmk.gv.at/wgportal/atlasmobile/map/Basiskarten/Basiskarte>, 2022.

- [85] OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik: OVE-Richtlinie R19 – Sicheres Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen, Ausgabe: 2021-06-01, 2021.
- [86] Green Car Congress: Mercedes-AMG reveals performance hybrid and battery-electric AMG derivative strategy, <https://www.greencarcongress.com/2021/03/20210331-amg.html>, 2021.
- [87] Kampker, A., Vallee, D., Schnettler, A.: Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 2.Auflage, Springer Vieweg Berlin, ISBN 978-3-662-53136-5, 2018.
- [88] Becker, J., Beverungen, D., Winter, M., Menne, S.: Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien – Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung. Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-21020-5, 2019.
- [89] Hochvolttechnik Glas – MSt. Helmut Glas. Training im Bereich Hochvolt im Kfz-Bereich. Werkzeuge und Ausstattung, <https://www.hvtechnik.at/werkzeuge-ausstattung.html>, 2020.
- [90] EmiControls: Quarantäne-Container – für Elektroautos, https://www.emicontrols.com/media/quarantine-container-de_web_1.pdf, 2021.
- [91] Grinschgl, A.: Fachinformationstag WKO Steiermark: Anforderungen zur Lagerung von Lithiumbatterien und Elektroaltgeräten mit Lithiumbatterien, https://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/12534313_4442778/54e77af1/03_Grinschgl_2016-10-19_WIN%20-%20Fachinformationstag.pdf, 2016.