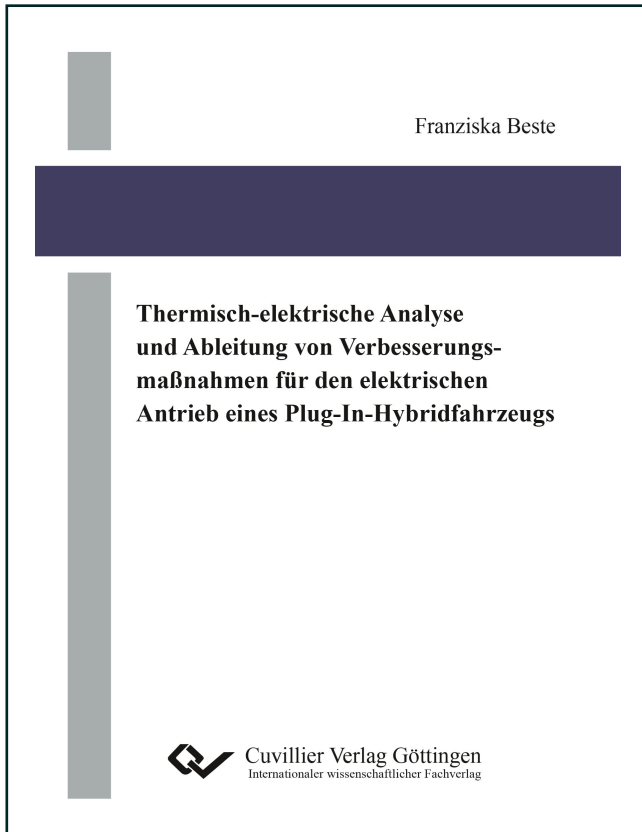




Franziska Beste (Autor)

Thermisch-elektrische Analyse und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für den elektrischen Antrieb eines Plug-In-Hybridfahrzeugs



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7297>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung und Zielsetzungen

Die Gesetzgebung für den zulässigen Ausstoß von CO₂-Emissionen für Personenkraftfahrzeuge setzt verbindliche Vorgaben. Die Regelung erlaubt in der europäischen Union pro Flotte einen durchschnittlichen Wert von 130 Gramm von CO₂ pro Kilometer bis 2015 und 95 Gramm bis 2020. Dies entspricht einen Kraftstoffverbrauch von 5.6 Liter beziehungsweise 4.9 Liter pro Kilometer. Die Bedeutung der Entwicklung von Fahrzeugen mit geringen Emissionen für die Automobilhersteller wird ersichtlich.

Mit einem Plug-In-Hybridfahrzeug wird gegenüber den rein elektrischen Fahrzeugen und dem Hybridfahrzeug eine längere elektrische Reichweite und ein hybridisches Fahren ermöglicht [1]. Für die Erhöhung der Reichweite und die Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs muss der Gesamtwirkungsgrad optimal ausgenutzt und verbessert werden [2]. Das Hochvoltsystem eines Plug-In-Hybridfahrzeugs setzt sich beispielhaft aus einer Lithium-Ionen-Batterie, einer Synchronmaschine, einer Leistungselektronik, einem Gleichspannungswandler und einem Ladegerät zusammen. Diese Komponenten besitzen thermische Charakteristika, die bei der Integration in das Fahrzeug wesentlich sind und berücksichtigt werden müssen. Das Wärmemanagement besitzt aktuell die Aufgabe, die entstehende Wärme der Bauteile abzuführen und die Elemente auf die geeignete Temperatur zu konditionieren.

In diesem Zusammenhang besteht der Bedarf an Verbesserungen für eine effiziente Kühlung und Vorwärmung der Komponenten, bei gleichzeitiger Minimierung des Energiebedarfs der elektrischen Verbraucher. Jede Hochvoltkomponente besitzt ein thermisches Betriebsfenster, in dem die jeweilige Leistung am effizientesten ist. Für den Erhalt einer möglichst genauen Zustandsbeschreibung der Bauteile, wird eine gesamtheitliche Betrachtung von der Fahrzeugebene bis zur Materialebene der Einzelteile unter realen Einsatzbedingungen erforderlich.

Thermische und elektrische Modelle der Hochvoltkomponenten und des Verbrennungsmotors unter stationären und transienten Bedingungen wurden in letzten Jahren erstellt [3] [4]. Diese sind aktuell in Forschungs- und Entwicklungsbereichen bereits im Einsatz. Aufgrund der Komplexität der Hochvoltsystemebene und der Betriebszustände steigt bei den Plug-In-Hybriden die Wichtigkeit einer gesamtheitlichen thermischen Fahrzeugbetrachtung. Des Gleichen sind Wechselwirkungen im Hochvoltsystem ausschlaggebend für die elektrische Effizienz des gesamten Fahrzeugs. In der Entwicklung muss frühzeitig eine simulative Analyse erfolgen, um die thermischen Anforderungen für die Fahrzeugintegration definieren zu können. Im Rahmen der Simulation sollen die Teilsysteme der Hochvoltsystemebene instationär zusammenschal-



tet werden, damit in warmen und kalten Umgebungsbedingungen die elektrischen Betriebszustände im realen Verkehrsgeschehen energetisch beschrieben werden können.

Die richtige Konditionierung der einzelnen Komponenten und die energetische Effizienz stellen konkurrierende Ziele dar. Welche Kühl- und Heizleistung für die Bauteile im realen Betrieb zur Verfügung gestellt werden muss, ist eine Frage, die nur in Abhängigkeit der Zustände, unter anderen den Wärmeverlusten, beantwortet werden kann. Um die anforderungsgerechte Konditionierung jedes Bestandteils zu gewährleisten, muss der Einsatz von Nebenverbrauchern, wie den Pumpen, den Ventilen, dem Kältemittel-Wasser-Wärmetauscher (Chiller) und den Heizelementen (Positive Temperature Coeffizients), analysiert werden.

Für die Variation von Fahrzyklen und der Umgebungsbedingungen ist eine Modellierung des Fahrzeuges sinnvoll. Eine Fahrzeugmodellierung ermöglicht eine zusätzliche Verbesserung des Verständnisses des Hochvoltsystems und kann die Durchführung von aufwendigen Fahrzeugmessungen reduzieren. Insbesondere für die Herleitung und Bewertung des neuen Ansatzes ist eine Simulation von großem Vorteil. Die Güte des Modells muss aufgezeigt und die Aussagefähigkeit bewiesen werden. Anhand von Fahrzeugmessungen muss eine Prüfung der Validität durchgeführt werden.

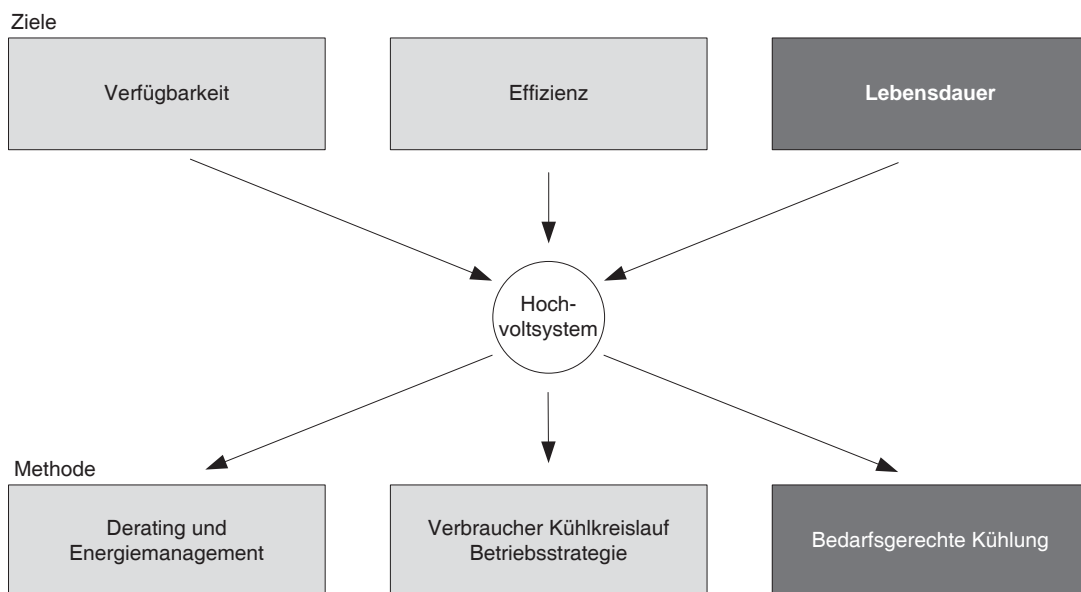


Abbildung 1.1: Optimierungsansätze des Hochvoltsystems

Das Ziel ist die eingehende Untersuchung der Wärmeverluste in den Hochvoltkomponenten und des gesamten energetischen Wirkungsgrades eines Plug-In -Hybridfahrzeugs. Die anschließende thermische Auslegung der Komponenten soll die elektrische Verfügbarkeit, eine hohe energetische Gesamteffizienz und eine garantierte Lebensdauer der Bauteile unter allen Umgebungsbedingungen gewährleisten, dargestellt in Abbildung 1.1. Das aktuelle Wärmemana-

gementsystem und die Ansteuerung der Kühlungsaktuatoren sollen in ihrem aktuellen Stand analysiert und Verbesserungen hergeleitet werden.

Neben einer Weiterentwicklung sind wesentliche Ziele eines innovativen Wärmemanagements in alternativen Antrieben die Reduzierung von Kosten, die Schaffung von Bauraum, die Reduktion des Gewichts und der optimale Einsatz der zur Verfügung stehenden Leistung durch die vorhandenen Energiespeicher [5].

Aus realen Fahrbedingungen und -anforderungen resultieren elektrische Leistungsflüsse. Diese generieren spezifische Wärmeverluste, die vom Kühlsystem bestmöglich abgeführt werden müssen. Die Verluste sowie das daraus resultierende Aufwärmen beeinflussen die Komponenten in ihrer Leistungsfähigkeit und ihre Alterungsmechanismen. Negative Einflüsse, verursacht durch die Temperaturen, bewirken in den Komponenten eine Einschränkung oder im Extremfall den Ausfall der Funktion.

Ein zu gestaltendes intelligentes Wärmemanagement berücksichtigt die Auswirkungen der Wärmeverluste und die Wechselwirkungen mit anderen Teilsystemen. Aus diesem Hintergrund schließt eine gesamtheitliche Betrachtung den Antriebsstrang und das Hochvoltsystem an sich, als auch die Klimatisierung, die Kühlsysteme und die Heizelemente mit ein.

Die zu erarbeitenden Wärmemanagementmaßnahmen ermöglichen Vorteile für die elektrische Verfügbarkeit, den Verbrauch von Energie und die Lebensdauer der Bauteile.

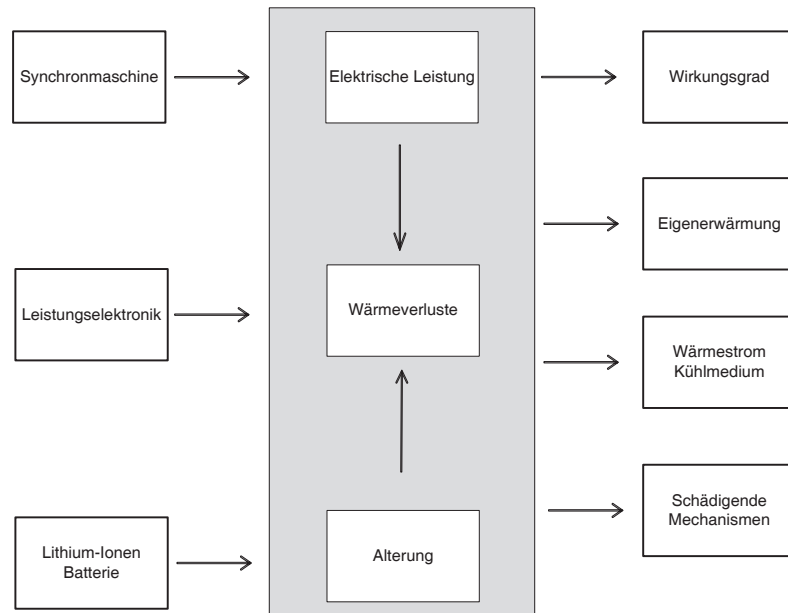


Abbildung 1.2: Vorteile gegenüber dem aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand



Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden in dieser Arbeit zwei innovative Methoden entwickelt, die das Hochvoltsystem thermisch-elektrisch berechnen und eine Bestimmung der optimalen Konditionierung in einer Fahrzeugumgebung durchführen. Aktuell wird eine Regelung der Kühlungsaktuatoren konstant nach den maximalen kritischen Werten der Hochvoltkomponenten zu Grunde gelegt. Wesentlicher Ansatz für eine deutliche Effizienzsteigerung sowie ein bedarfsgerechten Konditionieren ist eine gesamtheitliche Strategie des Hochvoltsystems. Diese bestimmt die Verlustleistungen und analysiert die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit. Auf Grundlage der Verlustleistungen und der Lebensdauermechanismen werden Sollwerte für das Kühlmedium generiert.

Die Zusammenhänge von der Lebensdauer, des thermischen Verhaltens und der Nutzung sind bekannt. Die Forschung ist bisher jedoch nicht auf die thermischen Wechselwirkungen in Bezug auf die Alterung des Systems näher eingegangen. Die Optimierung der Lebensdauer anhand der Reduzierung der Nutzung ist bereits in vielen Anwendungen umgesetzt. Ein neuer Ansatz ist, den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Kühlung darzustellen.

2 Erkenntnisstand für die alternativen Antriebe

Das Plug-In-Hybridfahrzeug vereint den komplexen verbrennungsmotorischen Antrieb mit konventioneller Kühlung und dem Hochvoltsystem mit zusätzlich notwendiger Kühlung der Hochvoltkomponenten. In den letzten Jahren werden verschiedenste Technologien und Innovationen für die Integration von alternativen Antrieben in die Fahrzeuge entwickelt. Der Begriff Hochvolt wird für Spannungslagen von höher 30V bis 1000V bei Wechsellspannung und höher 60V bis 1500V bei Gleichspannung nach der ECE R 100 definiert.

2.1 Systemarchitektur eines Plug-In-Hybridfahrzeugs

Ein Hybridfahrzeug wird definiert durch seinen hybriden Antrieb, der über zwei Energiequellen gespeist wird [6]. Neben dem Energiespeicher sind die wesentlichen Grundelemente die elektrische Maschine und die Leistungselektronik. Die drei-phasige Leistungselektronik besitzt einen Steuer- und Leistungsanteil, um das Antriebsmoment der elektrischen Maschine regeln zu können [7].

Für einen hybriden Antriebsstrang können vier grundlegende Hybridisierungsgrade definiert werden. Im **Micro-Hybrid** schaltet eine Start- und Stopp- Funktion den Verbrennungsmotor im Stand aus.

Im **Mild-Hybrid**-Konzept wird ein Hochvoltsystem integriert, das den Verbrennungsmotor in unterschiedlichen Betriebszuständen unterstützt sowie die Bremsenergie rekuperiert. Die erzeugte elektrische Leistung aus der Hochvoltbatterie kann bis zu 20kW betragen. Jedoch ist ein rein elektrisches Fahren nicht vorgesehen.

Der **Full-Hybrid**-Antrieb setzt sich aus einer elektrischen Maschine und einem Verbrennungsmotor zusammen. Mit diesem Konzept ist ein verbrennungsmotorisches, ein hybridisches und ein elektrisches Fahren möglich.

Bei dem Vollhybridfahrzeug existiert zusätzlich die Möglichkeit, die Traktionsbatterie extern zu laden (Plug-In). Diese Antriebsstruktur wird als **Plug-In-Hybrid** bezeichnet [7]. Diese Hybride können ebenfalls als Variante des Range Extender ausgeführt werden.

Die Kategorisierung der Hybridfahrzeuge erfolgt nach dem Antriebskonzept oder nach dem Energiespeicher. Die Antriebstopologie wird in seriell, parallel und leistungsverzweigt unterschieden. Der **serielle Hybrid** ermöglicht keine mechanische Trennung vom Verbrennungsmotor zu den angetriebenen Achsen. Die elektrischen Maschinen (Motor und Generator) sind in Reihe zum Verbrennungsmotor geschaltet.

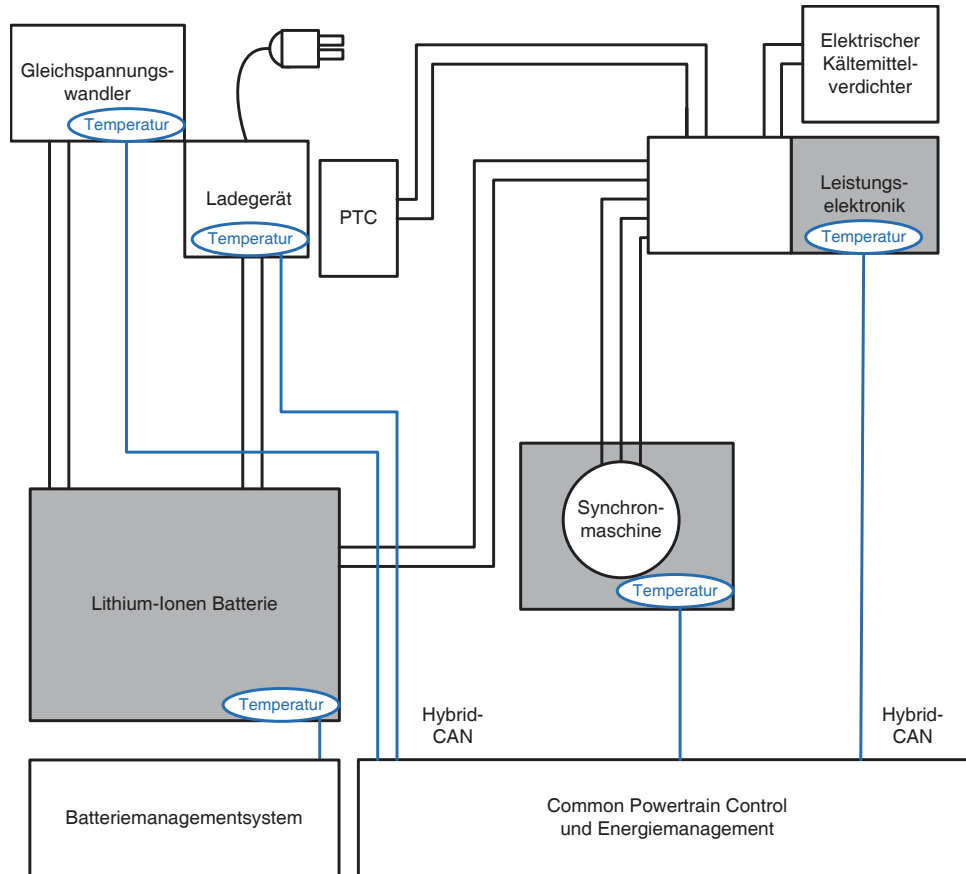


Abbildung 2.1: Struktur des Hochvoltsystems eines Plug-In Hybridfahrzeugs

Der **parallele Hybrid** ermöglicht eine Abkopplung vom Verbrennungsmotor und folglich das elektrische Fahren. In dieser Struktur ist nur eine elektrische Maschine erforderlich.

Der **leistungsverzweigte Hybrid** zeichnet sich durch seinen Mischbetrieb aus. Der Verbrennungsmotor gibt mechanische Leistung an die Antriebsachse, und des Weiteren wird elektrische Energie der Maschine hinzugefügt.

In der vorliegenden Untersuchung wird, aufgrund der ausgeprägten Anwendung in der Forschung und Entwicklung, ein paralleler elektrischer Antriebsstrang herangezogen, siehe Abbildung 2.2. Die ECE-Norm R101 reglementiert die korrekte Berechnung des Verbrauchs des Kraftstoffs und der elektrischen Leistung für Plug-In-Hybridfahrzeuge.

Der Kraftstoffverbrauch C berechnet sich aus dem Verbrauch $l/100\text{km}$ mit voller Hochvoltbatterie (State of charge = 100 Prozent) und aus dem Verbrauch $l/100\text{km}$ mit einer leeren Hochvoltbatterie (State of charge = 10 Prozent) [8].

$$C_{\text{Kraftstoff}} = \frac{(D_{\text{OVC}} \cdot C_{1,\text{Kraftstoff}} + D_{\text{av}} \cdot C_{2,\text{Kraftstoff}})}{(D_{\text{OVC}} + D_{\text{av}})} \quad (2.1)$$

Der Verbrauchswert der elektrischen Leistung wird äquivalent vorgeschrieben [8].

$$E = \frac{(D_E \cdot E_1 + D_{av} \cdot E_4)}{(D_e + D_{av})} \quad (2.2)$$

Bei der zugrunde gelegten parallelen Antriebstopologie handelt es sich um einen PLUG-IN-HYBRID der Daimler AG. Das rein elektrische Fahren ist mit dem herangezogenen Antrieb bis zu einer Reichweite von 33km möglich. Der zertifizierte Verbrauch berechnet sich auf 2,8 Liter pro 100km (kombiniert). Dies entspricht 65g CO₂ pro Kilometer.

Der ausgewählte Versuchsträger verfügt über einen V6-Benzinmotor mit 2,96 Liter Hubraum und einem Hybridmodul. Die elektrische Maschine ist ein permanent erregter Synchronmotor.

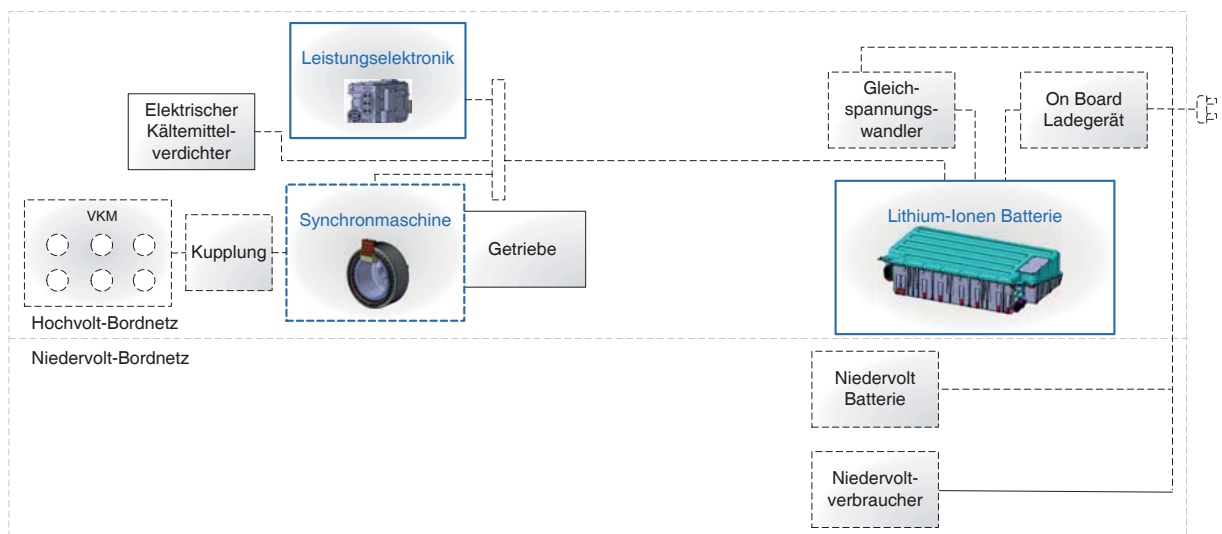


Abbildung 2.2: Anordnung der Hochvoltkomponenten eines Plug-In-Antriebs

Grundsätzlich werden für ein Plug-In-Hybridantrieb Betriebszustände definiert, die sich dadurch unterscheiden, in welcher Form der Antrieb durch den Elektromotor und den Verbrennungsmotor versorgt wird. Fünf Betriebsmodi kann der Fahrer vor Beginn der Fahrt wählen:

- HYBRID-MODE: Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb sind aktiv
- E-MODE: Rein elektrischer Antrieb
- E-SAVE: Geladene Batterie und deren State of Charge (SOC) wird gehalten
- CHARGE: Batterie wird während des Fahrens geladen

Das Zusammenarbeiten der beiden Antriebe kann in verschiedenen Betriebsfällen erfolgen. Das hybride Fahren bezeichnet den Zustand, in dem Verbrennungsmotor und Elektromotor zusammen oder abwechselnd das Fahrzeug antreiben.



In dem Zustand des rein elektrischen Fahrens erfolgt der Antrieb durch die elektrische Maschine. Der Verbrennungsmotor wird in diesem Zustand von der elektrischen Maschine getrennt.

Im Betriebszustand des Boostens wird der Antrieb durch den Verbrennungsmotor und den zugeschalteten elektrischen Motor mit zusätzlichem Drehmoment gespeist.

Zuletzt wird beim rekuperativen Bremsen die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie gewandelt und zur Beladung des Energiespeichers genutzt [7] [9]. Des Weiteren wird in dieser Arbeit der Ladevorgang der Batterie durch eine Ladestation betrachtet. Die Tabelle 2.1 fasst abschließend die technischen Merkmale des herangezogenen Referenzfahrzeuges zusammen.

Tabelle 2.1: Eigenschaften des Plug-In-hybriden Antriebsstrangs des Referenzfahrzeuges

Komponente	Technische Daten
Verbrennungsmotor	2.996 Liter-Benzinmotor, 6 Zylinder Nennleistung 245kW
Synchronmaschine	Nennleistung 85kW @ 3500 1/min
Getriebe	7-Gang Automatik
Gleichspannungswandler	Max.Leistung 4,0kW
Ladegerät	Max.Leistung 3,6kW, 400V/16A oder 230V/8A
Leistungselektronik	Dauer 190A(Effektivwert), Max. Strom 290A(Effektivwert)
Batterie	Lithium-Ionen, 120 Zellen @ 22Ah 6,1kWH (End of Life), Nennspannung 396V
Höchstgeschwindigkeit (E-MODE)	140km/h

2.2 Elektrische und mechanische Antriebsleistungen

Die Temperatur und die entstehende Abwärme der Antriebsstrangkomponenten, aufgeführt in Abbildung 2.3, haben einen hohen Einfluss auf die elektrische Leistung und auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs [10].

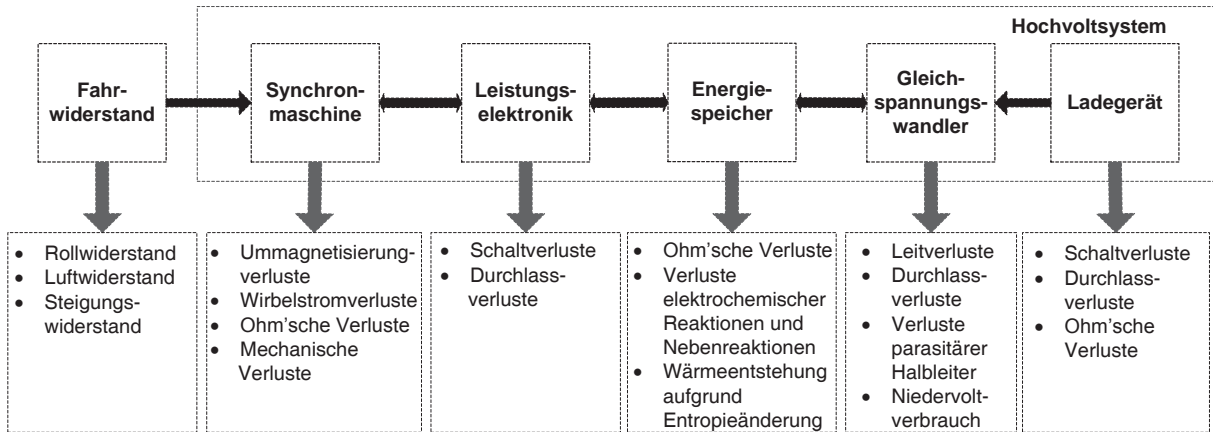


Abbildung 2.3: Aufzubringende Energie und resultierende Verluste des gesamtheitlichen Antriebs im elektrischen Betrieb

Eine Leistungsbilanz des gesamten Antriebs ergibt einen Überblick über die entstehenden Verlustleistungen. Die Leistung, die der Antriebsstrang während der Fahrt aufbringen muss, setzt sich unter anderem aus dem Fahrwiderstand und den resultierenden Verlusten zusammen [11].

$$P_W = F_W \cdot v \tag{2.3}$$

Der Fahrwiderstand bildet die Addition aus dem Roll-, Luft- und Steigungswiderstand.

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{ST} \tag{2.4}$$

Der Rollwiderstand nach [5] ist aufgrund der Reibwirkung des Reifens und der Fahrbahn eine wesentliche Beeinflussungsgröße der Antriebsleistung.

$$F_{Ro} = f_{Ro} \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha_{ST} \tag{2.5}$$

Die Luftanströmung des Fahrzeugs wird durch den Luftwiderstand definiert [11]. Die Umgebung des Fahrzeugs wird mittels Luftdruck, -dichte und -temperatur beschrieben.



Für jede lokale Höhe ergibt sich ein spezifischer Luftdruck und eine örtliche Temperatur, aus denen die Luftdichte hergeleitet werden kann. Die Norm DIN 4710 erörtert Statistiken zu meteorologischen Daten in Deutschland.

$$p = p_0 \cdot \exp \left[-\frac{g}{R_L \cdot T} \cdot z \right] \quad (2.6)$$

$$F_L = 0.5 \cdot \rho_{LU} \cdot c_w \cdot A_{Fzg} \cdot (v_{Fzg} + v_{Wind})^2 \quad (2.7)$$

Der Steigungswiderstand ist abhängig von der Fahrzeugmasse, der Gravitationskraft und dem Steigungswinkel.

$$F_{St} = m_{Fzg} \cdot g \cdot \sin \alpha_{ST} \quad (2.8)$$

Die zu erbringende Leistung im elektrischen Modus setzt sich aus dieser geforderten Fahrleistung und den Wirkungsgraden der aktiven Komponenten zusammen [12], die wiederum von ihren Verlusten beeinflusst werden.

$$E_{Gesamt,Antrieb} = \int_0^{t_{End}} P_{Gesamt,Antrieb} dx \quad (2.9)$$

Diese Energie wird dem Energiespeicher letztendlich entnommen. Im elektrischen Fahrmodus wird die Fahrleistung wie folgt bestimmt.

$$P_{Fahrleistung} = P_{El} \cdot \eta_{Bat} \cdot \eta_{Inverter} \cdot \eta_{EM} - P_{Niedervolt} \cdot \eta_{DCDC} - P_{HV-PTC+eKMV} \quad (2.10)$$

Die Leistung im Zustand des Ladens resultiert hingegen aus der Eingangsleistung an dem Ladegerät. Des weiteren wird der Verbrauch aus dem 12V Bordnetzes gespeist. Die Wärmeverluste der aktiven Komponenten wirken sich auf die verbleibende Ladeleistung der Batterie aus.

$$P_{Ladeleistung} = P_{El} \cdot \eta_{Bat} \cdot \eta_{OBL} - P_{Niedervolt} \cdot \eta_{DCDC} - P_{HV-PTC+eKMV} \quad (2.11)$$

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten des elektrischen Antriebs genauer betrachtet.