



---

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren hat das Thema CO<sub>2</sub>-Emissionen immer mehr an Bedeutung gewonnen und die Anforderungen an die Produkte der Automobilhersteller verändert. Um die weltweiten Emissionsziele zu erfüllen, wird eine Vielzahl unterschiedlicher Optimierungsansätze des Antriebsstranges verfolgt. So stellen neben immer sparsameren und effizienteren Verbrennungskraftmaschinen, die Entwicklung von Elektro- und Hybridfahrzeugen einen wesentlichen Schwerpunkt dar.

Ein Vorteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen liegt darin, dass sie beim Abbremsen des Fahrzeugs einen Teil der kinetischen Energie mittels der elektrischen Maschine in elektrische Energie umwandeln können, um diese in der Batterie zu speichern und später für den Antrieb des Fahrzeugs nutzen zu können.

Reine Elektrofahrzeuge bieten des Weiteren den Vorteil der lokalen Emissionsfreiheit, d.h. sie verursachen während der Fahrt keine umweltbelastenden Schadstoffe, was vor allem in Städten und Ballungsräumen zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen soll. Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass für die Bilanzierung des Energieverbrauchs ebenfalls die Erzeugung der elektrischen Energie berücksichtigt werden muss und ein ganzheitlich emissionsfreies Fahren nur mit Strom aus erneuerbaren Energien möglich ist [24]. Im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ [7] definiert die Bundesregierung eine Million Elektro- bzw. steckdosentaugliche Fahrzeuge [3] auf deutschen Straßen bis 2020 sowie Deutschland als Leitmarkt der Elektromobilität als wesentliche Ziele.

Um diese Ziele zu erfüllen, soll eine Vernetzung von Forschern aus Industrie und Wissenschaft vorangetrieben und der intensive Wissensaustausch gefördert werden. Des Weiteren soll auch eine möglichst enge Verzahnung der Branchen Automobil, Energie und Informationstechnologie gefördert werden, um somit eine möglichst effiziente Wertschöpfungskette zu gestalten und Arbeitsplätze in Deutschland zu sichern und zu schaffen [7]. Somit spielen nicht nur die Bedeutung des Umwelt- und Ressourcenschutzes eine Rolle bei der Diskussion über die Entwicklung von Elektrofahrzeugen, sondern auch die Stärkung und der Ausbau der Führungsrolle der deutschen Automobil- und Zuliefererindustrie [7].

Dabei unterliegt die Entwicklung von Elektrofahrzeugen einer Vielzahl von Randbedingungen, wie z.B. gesetzlichen Vorgaben oder Kundenanforderungen, die stark



## Einleitung

---

von Eigenschaften konventioneller Fahrzeuge geprägt sind [1]. So haben Umfragen ergeben, dass 80 % der potenziellen Käufer von einem Elektrofahrzeug eine Reichweite von mindestens 300 km erwarten [2]. Gleichzeitig sind jedoch nur ca. 45 % der Befragten bereit, einen Aufpreis von mehr als 2000 € für einen umweltverträglichen Antrieb zu zahlen [2]. Bei einem Preis von ca. 10.000 € pro 100 km [55] allein für die Batterie eines Elektrofahrzeugs wird deutlich, welche hohen Anforderungen an die Entwicklung von Elektrofahrzeugen gestellt werden.



---

## 2 Motivation

Während bei den verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen die Antriebscharakteristik fortlaufend analysiert und optimiert wurde, liegen bei dem Elektrofahrzeug keine Untersuchungen hinsichtlich des Fahrleistungseindrucks bei unterschiedlichen Drehmoment- und Leistungsverlauf vor.

Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, ein Maß für den Fahrleistungseindruck eines Elektrofahrzeugs zu erarbeiten und dessen Einfluss auf die Antriebsstrangauslegung zu beleuchten.

Weiterführend ist unter der Prämisse der Weiterentwicklung der Batterietechnologie ein Referenzfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 190 km/h unter dem Beibehalten der Randbedingungen (maximaler Drehzahl, maximalem Drehmoment der E-Maschine und dem Übersetzungsverhältnis des Getriebes) und unter Berücksichtigung von Fahrleistungseindruck und Verbrauch nachzubilden.

Im zweiten Schritt werden die festen Rahmenparameter und somit der Suchraum erweitert und die maximale Drehzahl sowie das Übersetzungsverhältnis unter Berücksichtigung von Kostenszenarien optimiert und der Einfluss der Kostenentwicklung von Kostentreibern für zukünftige Fahrzeugauslegungen aufgezeigt.



---

## 3 Beschreibung des neuen PFI für elektrische Antriebe

### 3.1 *Stand der Technik für die Beurteilung eines Elektrofahrzeugs*

Neben der Reichweite ist auch der subjektive Fahrleistungseindruck eines Fahrzeugs ein entscheidendes Kaufkriterium. Dieser soll in der vorliegenden Arbeit näher untersucht und quantifiziert werden.

In bisherigen Veröffentlichungen [58], [6], [11], in Informationsprospekten der Fahrzeughersteller und in Vergleichstests von Fachzeitschriften werden häufig nur die zwei folgenden Standardkennwerte für die Beurteilung der Fahrleistung herangezogen:

- Beschleunigung von 0 – 100 km/h
- Elastizität im  $v_{\max}$ -Gang von 80 – 120 km/h

Durch diese Angaben wird der Beschleunigungsvorgang eines Fahrzeugs durch die Beschleunigungszeit charakterisiert.

Allerdings sind diese Zeitenangaben wie die Veröffentlichungen [43], [17] zeigen, kein Maß für den eigentlichen Eindruck, den das Fahrzeug bezogen auf unterschiedliche Antriebstechnologien wie zum Beispiel Otto und Diesel-Verbrennungsmotoren oder Fahrzeuge mit Elektromotor vermittelt.

Um diesen Technologievergleich durchführen zu können, wurden für Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor bereits Kenngrößen eingeführt und veröffentlicht, die auf die Beschleunigung des Fahrzeug in verschiedenen Gängen zurückzuführen sind [43], [17]. Diese Kenngrößen beziehen sich lediglich auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, wobei das Beschleunigungsvermögen dem Drehmoment des Antriebs sowie der maximalübertragbaren Zugkraft eines Fahrzeugs entspricht.

In [17] wird das dynamische Verhalten des Fahrzeugs anhand von zwei Kriterien bewertet. Zum einen anhand des zurückgelegte Wegs innerhalb von 2,5 Sekunden nach einem Ampelstart sowie zum anderen anhand des zurückgelegten Wegs nach ebenfalls 2,5 Sekunden nach einem Lastsprung im zweiten Gang bei 1500 1/min und vorangehender Konstantfahrt. Bei beiden Bewertungen des Ansprechverhaltens ist die Auslösebedingung ein 100% Fahrpedalwert. Speziell der zweite Ansatz mit Gang

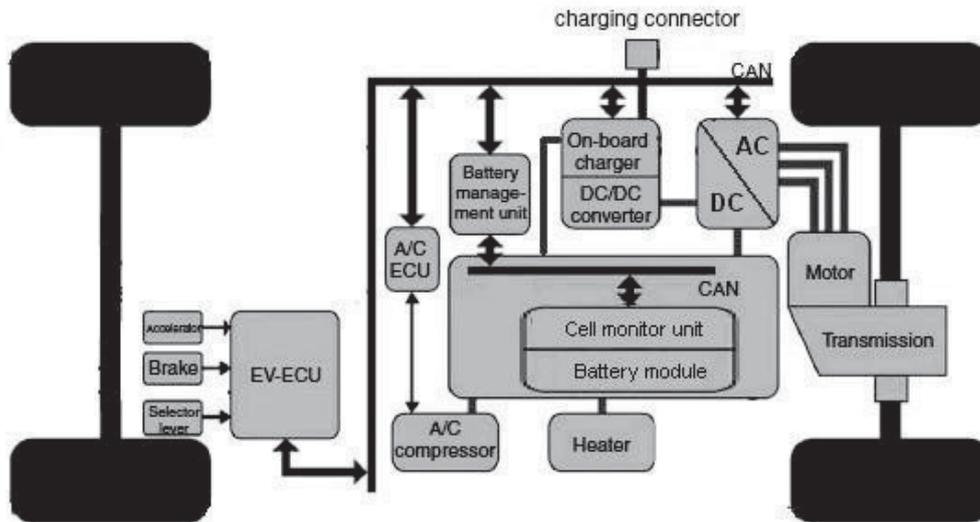


und Drehzahlangabe ist für ein Eingang-Getriebe, wie zum Beispiel in einem Elektrofahrzeug, nicht ausführbar.

Ebenso beschränkt sich die methodische Vorgehensweise in [49] auf die Bewertung des Anfahrverhaltens. Hierbei werden die resultierende Beschleunigung und der Ruck beim Anfahren für die Antriebsauslegung vorgeschlagen. Dieser Ansatz ließe sich auf das Elektrofahrzeug übertragen, ist aber für das gesamte Drehzahlband nicht aussagekräftig genug. Zusätzlich wurde in [49] keine Probandenvalidierung zur Bestätigung des Bewertungskennfeld durchgeführt.

Aus dieser Situation heraus ergibt sich der innovative Ansatz zur Ermittlung und Nutzung des Performance Feel Index (PFI) für die Fahrzeugantriebsauslegung, der im Folgenden aus einer Probandenerprobung hergeleitet wird. Die daraus folgenden Konsequenzen für die Antriebsstrangauslegung bei unterschiedlichen Batteriekostenszenarien können ebenfalls abgeleitet werden.

Der Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen ist das System, welches sich grundlegend von dem konventioneller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unterscheidet. Elektrofahrzeuge verfügen im Vergleich zu Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeugen, die als Haupt- beziehungsweise Nachladeantrieb einen zusätzlichen Verbrennungsmotor besitzen, als Antrieb einzig eine Elektrische Maschine (EM). Die Energiequelle ist dabei kein Flüssigkraftstoff, sondern ein aus mehreren Einzelzellen bestehendes Batteriepack oder eine Brennstoffzelle. Den durch die Batterie gelieferten Gleichstrom muss der Pulswechselrichter in Dreiphasenstrom, der für die EM benötigt wird, umwandeln, wobei die Kraftübertragung meist über ein Ein-Gang-Getriebe auf die Antriebsräder erfolgt. Die Interaktion der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 3.1 ersichtlich.



**Abbildung 3.1: Aufbau Antriebssystem Elektrofahrzeuge ([40], abgewandelt)**

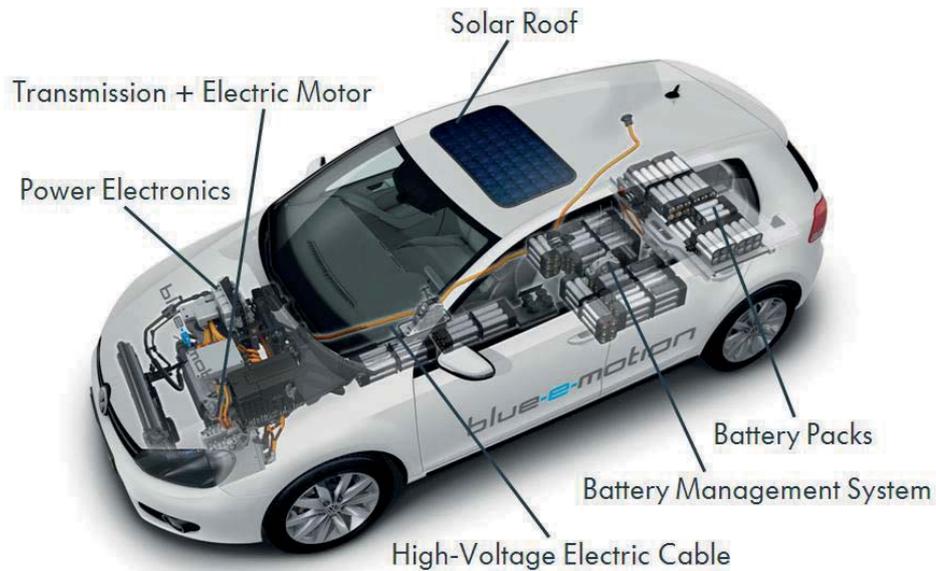
Weitere Komponenten sind die in der Leistungselektronik vereinte Steuereinheit des kompletten EV-Antriebs (EV-ECU) und das in die Batterie integrierte Batteriemanagementsystem (Battery Management Unit oder Battery Management System (BMS)), welche auf die Daten der Batteriezellen-Überwachungseinheit (Cell Monitor Unit) zurückgreifen und zusätzlich das Klimaanlage-Steuergerät (A/C ECU) zur Kühlung (A/C Compressor) und Heizung (Heater) der Batterie ansteuern können. Zusätzlich benötigt wird ein DC/DC-Wandler, der die von der Batterie gelieferte Hochvolt-Spannung auf für die Bordelektronik verträgliche 12V Niederspannung wandelt. Dieser ist meist mit dem Pulswechselrichter in die Leistungselektronik integriert, ebenso wie eine HV-Batterieladevorrichtung (On-Board Charger) mit entsprechendem Anschluss, die den Wechselstrom aus dem Stromnetz in Gleichstrom zum Laden der HV-Batterie wandelt.

### 3.1.1 Conversion Design und Purpose Design

Den Fahrzeugherstellern stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, eine Elektrofahrzeug-Basis zu entwickeln: das Conversion Design oder das Purpose Design. Beim Conversion Design wird ein vorhandenes Fahrzeugkonzept - zum Beispiel ein zunächst für konventionelle Antriebe entwickelter Kompakt-PKW - angepasst, um den Erfordernissen eines Elektrofahrzeugs nachzukommen (Abbildung 3.2). Dazu sind Maßnahmen im Fahrzeuginneren sowie an der Karosserie nötig. Die Unterbringung der Batterien stellt dabei eine Kernherausforderung dar, da sie aufgrund des im Ver-



gleich zu Benzin und Diesel geringen Energieinhalts eine erhebliche Größe und damit auch ein hohes Gewicht besitzen. Modifikationen sind dafür an Fahrzeugboden, Kofferraum und Mitteltunnel inklusive Befestigungsmöglichkeiten notwendig, um eine nur wenig Nutzraum beeinträchtigende aber auch crashsichere Platzierung der Batterie zu gewährleisten. Weitere Anpassungen sind zur sicher geführten Verkabelung der Hochvoltkomponenten zu tätigen. Das höhere und im Fahrzeug unverteilte Gewicht bedingt Veränderungen am Fahrwerk und an Bremsen. Vorteilhaft beim Conversion Design sind die bereits vorhandene, auf Crashsicherheit geprüfte Karosseriestruktur, sowie die erreichten Standards bei Komfort, Zuverlässigkeit und Service. Aufgrund der bereits zur Verfügung stehenden Karosserieteile können des Weiteren die Kosten für den Prototypenbau und die spätere Serienfertigung gering gehalten werden. Als Vorteil für die Fahrdynamik weist sich die Schwerpunktsenkung durch Unterbringung der Batterie im Fahrzeugboden aus. Allerdings sind durch die nach hinten verschobene Achslastverteilung Änderungen am Fahrwerk notwendig. Nachteilig sind zudem die raumeinschränkende Batterieanordnung, das durch die kompromissbehaftete Konstruktion nicht optimierte, hohe Gewicht und die damit einhergehenden schlechteren Fahrleistungen bei gleicher Motorisierung ebenso wie eine geringere Reichweite. Darüber hinaus muss das bestehende 12V-Bordnetz des konventionellen Fahrzeugs um das Hochvolt-Netz, das für den Betrieb der elektrischen Maschine nötig ist, erweitert werden. Auch sind zusätzliche Kontrollanzeigen wie zum Beispiel für den Batterieladestand harmonisch in die Armaturen des Fahrzeugs zu integrieren.



**Abbildung 3.2: Conversion Design – Volkswagen Golf blue-e-motion [27]**

Das Purpose Design ist die konsequentere, kompromisslose Neukonzeption eines Fahrzeugs auf die Anforderungen eines Elektrofahrzeugs, dargestellt in Abbildung 3.3 anhand des BMW i3. Dabei können die hauptsächlichen Randbedingungen hinsichtlich Technik, Emissionen und Wirtschaftlichkeit wesentlich gezielter berücksichtigt werden. Den schweren Batterien geschuldet ist ein besonders hoher Leichtbau-grad in der Karosserie- sowie Rahmenkonstruktion anzustreben, welcher gute Fahrleistungen und eine hohe Reichweite ermöglicht, allerdings unter anderem Herausforderungen in der Crashesicherheit darstellt. Diesen Herausforderungen kann mit einem Einsatz einer Space-Frame-Bauweise oder Faserverbundkunststoff-Karosserien mit zusätzlichem Stoßgürtel begegnet werden [57]. Mit Hilfe einer geeigneten Anordnung von Antrieb und Batterie können die Eigenschaften im Crashfall optimiert werden. Beispielsweise wird bei der Unterfluranordnung, dem Sandwichboden, die Batterie durch umlaufende, schwer verformbare Rahmenstrukturen geschützt und die EM bei einem Frontalaufprall durch abweisende Rahmenelemente unter die Fahrgastzelle geschoben. Die aufwändige Konstruktion verursacht vor allem in der Kleinserie allerdings sehr hohe Kosten in der Entwicklung und Fertigung, weshalb bei den zukünftig zunächst geringen zu erwartenden Stückzahlen an Elektrofahrzeugen auch auf Conversion Designs zurückgegriffen wird.



**Abbildung 3.3: Purpose Design – BMW i3 mit Carbon-Karosserie [23]**

### 3.1.2 Vor- und Nachteile von Elektrofahrzeugen

#### 3.1.2.1 Vorteile

- Lokale Emissionsfreiheit
- Energieerzeugung kann auf verschiedene Weise erfolgen
- Globale Emissionsfreiheit bei kohlenstoffneutraler, regenerativer Energieerzeugung
- Geräuscharmer Antrieb
- Wartungsarmer Antrieb
- Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation)
- Energiekosten (Stromkosten) pro Fahrkilometer für den Endkunden aufgrund der unterschiedlichen Energiebesteuerung geringer als bei konventionellen Kraftstoffen

#### 3.1.2.2 Nachteile

- Energie- und Leistungsdichten heutiger Batterien deutlich geringer als bei konventionellen Kraftstoffen
- Dadurch bedingte reduzierte Reichweite beziehungsweise hohes Fahrzeuggewicht bei Einsatz von Batterien mit höherem Energieinhalt