

# 1

## Einführung

### Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

Unter Elektromobilität versteht man den Personen- und Güterverkehr mit Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden. Strenggenommen zählt dazu auch die Eisenbahn, die in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Schwerpunktmäßig befasst sich das Buch mit Elektrofahrzeugen/Elektroautos/Elektromobilen/E-Fahrzeugen, wie sie häufig etwas uneinheitlich bezeichnet werden. Aber auch Elektrofahrräder und -motorräder sowie Elektrobusse gehören dazu, sie werden kurz beschrieben.

Zur genauen Definition der Elektrofahrzeuge wird eine Aufteilung angeführt, die im *Nationalen Entwicklungsplan zur Elektromobilität* der Bundesregierung von 2009 festgelegt ist. Es sind danach folgende Fahrzeuge, die von (mindestens) einem Elektromotor angetrieben werden:

**Tabelle 1.1** Typen von Elektrofahrzeugen

Fahrzeugtyp	Englische Bezeichnung	Beschreibung
(Reines) Elektrofahrzeug	Battery Electric Vehicle (BEV)	Antrieb mit Elektromotor und mit am Netz aufladbarem Akku (Batterie)
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (= mit Range Extender, REX)	Range Extended Electric Vehicle (REEV)	Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung des Akkus
Plug-in-Hybridfahrzeug	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	Kombination Elektroantrieb und Verbrennungsmotor, Akku am Netz aufladbar
Hybridfahrzeug	Hybrid Electric Vehicle (HEV)	Verbrennungsmotor plus Elektromotor, Akku nicht am Netz aufladbar
Brennstoffzellenfahrzeug	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV)	Elektromotor plus Brennstoffzelle zur Energieerzeugung

**Bild 1.1**

Studie eines Elektrofahrzeugs. Quelle: Robert Bosch GmbH

### **Warum und wie unterstützt die Bundesregierung Elektromobilität?**

Nach Ansicht der Bundesregierung ist die Elektrifizierung der Antriebe ein ganz wesentlicher Baustein für eine zukunftsfähige Mobilität. Sie bietet die Chance, die Abhängigkeit vom Öl zu reduzieren, die Emissionen zu minimieren und die Fahrzeuge besser in ein multimodales Verkehrssystem zu integrieren.

Dazu wurde gemeinsam mit Fachleuten der bereits erwähnte *Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität* ausgearbeitet. Sein Ziel war und ist es, die Forschung und Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Der Plan ist im Einklang mit ähnlichen Umsetzungsplänen unserer europäischen Nachbarländer sowie der USA, Japan und China.

Gegenstand des *Nationalen Entwicklungsplans* sind die reinen Elektrofahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung und die Plug-in-Hybridfahrzeuge. Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge sind zwar nicht direkt Gegenstand des Nationalen Entwicklungsplans, allerdings entsteht auch für sie ein Nutzen durch entsprechende Synergieeffekte.

Zur Unterstützung der Umsetzung des Entwicklungsplans wurde 2010 als Beratungsgremium der Bundesregierung die *Nationale Plattform Elektromobilität*, NPE, gegründet. Das Gremium beobachtete und analysierte die Entwicklungen im Bereich Elektromobilität. Daraus wurden Empfehlungen abgeleitet, wie die Ziele des *Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität* erreicht werden können. Zusammengefasst wurden die Erkenntnisse in Fortschrittsberichten an die Bundesregierung, im Juni 2012 und im Dezember 2014 sowie zuletzt im Jahr 2018. Die Tätigkeit der *Nationalen Plattform Elektromobilität* wurde **zum 31. Dezember 2018 beendet** und die Themen in die Struktur der *Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)* überführt.

Mitglieder waren etwa 20 hochrangige Experten, die in Arbeitsgruppen folgende wichtige Themen bearbeiteten:

- Antriebstechnologie,
- Batterietechnologie,
- Ladeinfrastruktur und Netzintegration,
- Normung, Standardisierung und Zertifizierung,
- Materialien und Recycling,
- Nachwuchs und Qualifizierung,
- Rahmenbedingungen.

### **Gibt es auf dem Markt alltagstaugliche Elektrofahrzeuge?**

Bezogen auf reine Elektrofahrzeuge ist diese Frage eindeutig mit „Ja“ zu beantworten. Bereits seit der **Internationalen Automobil-Ausstellung 2013**, auf der BMW mit dem *i3*, VW mit dem *e-up* und *e-Golf* (2014) reine Elektrofahrzeuge präsentiert haben, gilt die Aussage, dass mittlerweile praktisch alle namhaften Automobilhersteller serientaugliche Elektrofahrzeuge mit steigender Modellvielfalt im Programm haben.

Die Alltagstauglichkeit solcher Fahrzeuge wurde seither durch zahlreiche Flottenversuche belegt und durch Serienfahrzeuge (z. B. dem *smart electric drive* und dem *Nissan Leaf*, bereits seit 2010 auf dem Markt) im täglichen Betrieb getestet.

Diese Fahrzeuge haben durchzugsstarke Motoren, sind wie herkömmliche Fahrzeuge hervorragend ausgestattet und erreichen inzwischen Reichweiten, die für die meisten Alltagsfahrten ausreichend sind.

Neben dem Angebot an reinen Elektrofahrzeugen gibt es ein steigendes Angebot an Plug-in-Hybriden, die sowohl mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor ausgestattet sind als auch mit Elektroantrieb und Akku. Mit diesen Fahrzeugen können Kurzstrecken bis typischerweise mehr als 50 km rein elektrisch gefahren werden. Für größere Reichweiten kommt dann der konventionelle Antrieb zum Einsatz. Insbesondere ab dem Jahr 2020 hat das Angebot an solchen Fahrzeugen mit stetig verbesserten Verbrauchs- und Reichweitendaten nochmals deutlich an Dynamik gewonnen.

### **Woher kommt der Strom für Elektrofahrzeuge?**

Elektrofahrzeuge haben bezüglich dieser Frage einen grundsätzlichen Vorteil: Sie können im Prinzip an jeder Steckdose geladen werden und können damit auf eine vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Auch Strom ist derzeit ausreichend verfügbar. Überschlagsrechnungen zeigen, dass im Jahr 2021 der Stromverbrauch für etwa eine Million Elektrofahrzeuge (reine und Plug-in) auf deutschen Straßen weniger als 0,6% der Nettostromerzeugung in Deutschland betrug. Betrachtet man die von der Bundesregierung für das Jahr 2030 angestrebte Zahl von 15 Millionen Elektrofahrzeugen, so steigt der Anteil auf knapp 10% (bezogen auf die Stromerzeugung).

gung 2021). Wenn man zugrunde legt, dass der verwendete Strom regenerativ erzeugt werden soll, fordert dieser prognostizierte Bedarf deutlich verstärkte Anstrengungen für den weiteren Verlauf der Energiewende.

Gerade weil Elektrofahrzeuge dann besonders umweltfreundlich sind, wenn sie mit regenerativ erzeugtem Strom geladen werden, hat die Politik im *Nationalen Entwicklungsplan* die Kopplung der Elektromobilität an die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien festgeschrieben.

### **Welche Eigenschaften haben Elektrofahrzeuge und wie kommen sie beim Käufer an?**

Die Eigenschaften der reinen E-Fahrzeuge, wie sie derzeit breit diskutiert werden und welche die Kaufentscheidungen der Kunden maßgeblich beeinflussen, lassen sich kompakt zusammenfassen:

Elektromobile sind leise, haben einen geringen Energieverbrauch und sind vor Ort emissionsfrei. Sie sind, selbst wenn man die zur Ladung notwendige Erzeugung des Stroms mit dem sogenannten „Strommix Deutschland“ berücksichtigt, umweltfreundlicher als herkömmliche Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Dem stehen aber zwei gravierende Nachteile entgegen: (Reine) Elektromobile haben eine geringe Reichweite. Kam bereits die erste Generation der Fahrzeuge (ab 2013) zwar im Realbetrieb schon auf Werte über 150 km, einem Bereich, der für die meisten Nutzer mehr als 90% der Tagesfahrten abdeckt. Gleichwohl bleiben die restlichen, längeren Fahrten, die mit dem Fahrzeug nur schwer zu realisieren sind. Deshalb wird eine Infrastruktur aufgebaut, die bei längeren Fahrten ein Zwischenladen an öffentlichen Stromladesäulen in vertretbarer Zeit ermöglichen soll. Die Fahrzeuge der Generation ab 2020 mildern den Reichweiten-Nachteil deutlich: Reichweiten von 300 km bis 500 km und darüber sind (je nach gewählter Akkukapazität) nicht mehr unüblich und Schnellladefähigkeit wird zunehmend zum Standard. Trotzdem bleibt für Fernfahrten der Nachteil, dass das Laden an einer Stromtankstelle deutlich länger dauert, als das konventionelle Tanken.

Ein weiterer Nachteil: Elektroautos sind teuer! Die Mehrkosten zum herkömmlichen Fahrzeug sind hauptsächlich durch den teuren Akku bedingt. Das ist auch mit geringen Betriebskosten schwer aufzufangen. Daher lief der Verkauf eher schleppend. In Deutschland (und vielen anderen Ländern) wird durch Kauf-/Umweltprämien auch dieser Nachteil deutlich verringert.

### **Wie entwickelt sich die Situation?**

Nicht erst seit den letzten Jahren wird deutlich, dass dem Klimawandel auf allen Ebenen entgegengewirkt werden muss. Damit werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verbrennermotoren zunehmend kritisch betrachtet und durch stetig strenger werdende Grenzwerte deutlich beschränkt. Die dadurch erforderlichen Anstrengun-

gen zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wird die Verbrennerfahrzeuge verteuern. Und der Druck auf die Automobilindustrie, den Anteil an (zumindest lokal) emissionsfreien Fahrzeugen zu erhöhen, wird wachsen. Gleichzeitig ist aber auch schon abzusehen, dass die Kosten für die teuren Akkus in den nächsten Jahren weiter deutlich sinken werden, sodass sich die Wirtschaftlichkeit zugunsten der E-Fahrzeuge verbessert.

Verbessern wird sich durch die technische Entwicklung weiterhin die Reichweite. Aber sie wird, soweit das heute abschätzbar ist, auch in den nächsten Jahren nicht in den Bereich heutiger Dieselautos kommen. Diesbezüglich wird ein E-Fahrzeug ein herkömmliches Fahrzeug für große Strecken nicht ohne Weiteres ersetzen können. Aber es gibt inzwischen (und es wird mehr geben) auch Ansätze zu einem Verkehrssystem, wie man mit diesem Nachteil umgeht, ohne die Gesamtmobilität zu beeinträchtigen.

### **Was ist die Zielrichtung dieses Buchs?**

Schon der erste Überblick dieses Kapitels zeigt, dass die Einführung der Elektromobilität eine komplexe Angelegenheit ist. In den folgenden Darstellungen werden die technischen Sachverhalte fundiert analysiert, Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit dieser Antriebe vorgestellt und Modellrechnungen/Simulationen durchgeführt. Weiter werden der Stand der Technik des Elektromobils erarbeitet und Grundlagen für realistische Kostenberechnungen erstellt.

Mit diesen Erkenntnissen kann ein Vergleich der zwei Systeme, Elektrofahrzeuge und Otto- bzw. Dieselfahrzeuge, sachgerecht durchgeführt werden. Damit lassen sich dann fundierte Aussagen treffen, mit welchen Verkehrskonzepten, welchen notwendigen Randbedingungen (einschließlich der Energieerzeugung) und ggf. mit welchen Fördermaßnahmen das E-Mobil einen sinnvollen und wirksamen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität liefern kann.

Das Buch kann somit als Sach-, aber auch als Lehrbuch für die Grundlagen der Elektromobilität genutzt werden.

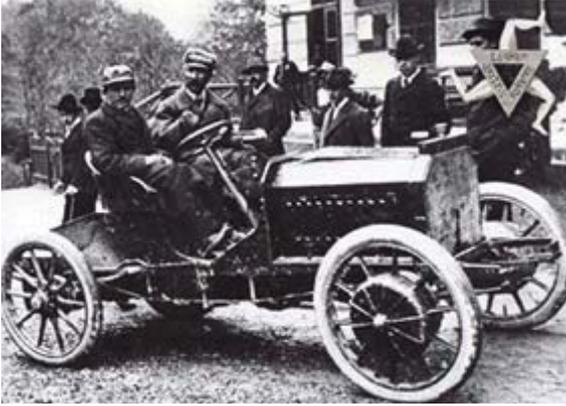
# 2

## Überblick Elektrofahrzeuge

Versuche, Elektromotoren als effektiven Antrieb für Kraftfahrzeuge zu nutzen, gab es im Prinzip seit Erfindung des Automobils. Allerdings haben es erst die in den letzten Jahren erzielten technologischen Fortschritte in der Akkutechnik erlaubt, alltagstaugliche Elektrofahrzeuge als Konkurrenz zu den herkömmlichen Verbrennungsmotor-Kraftfahrzeugen auf den Markt zu bringen.

### ■ 2.1 Geschichte und grundsätzliche Bedeutung

Das Automobil wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Damals wurde nicht nur der Ottomotor erfunden und bis zur Nutzungsreife entwickelt. Es wurde auch erfolgreich an Elektrofahrzeugen gearbeitet. 1882 stellte Werner Siemens seinen elektrischen Kutschenwagen in Berlin vor. Auf der Weltausstellung im Jahr 1900 in Paris wurde dann ein praxistaugliches Elektroauto der Weltöffentlichkeit präsentiert, der „Lohner-Porsche“ (siehe Bild 2.1). Der wurde vom damals 25-jährigen Ferdinand Porsche in der k. u. k.-Hofwagen-Fabrik Jacob Lohner & Co., Wien, entwickelt. Das Fahrzeug hatte als Antrieb zwei Radnabenmotoren an den Vorderädern, war 50 km/h schnell und hatte mit einem 400 kg schweren Bleiakku eine Reichweite von beachtlichen 50 km. Da die Reichweite der Benzinmotoren deutlich größer war, setzten sich diese – wie hinlänglich bekannt – überaus erfolgreich durch.

**Bild 2.1**

Ferdinand Porsche (Fahrer) und Ludwig Lohner (Beifahrer) im Lohner-Porsche. Quelle: Archiv Familie Lohner

Ende des 20. Jahrhunderts gab es dann immer wieder Versuche, die möglichen Vorteile des Elektroantriebs im Kraftfahrzeug zu nutzen. Allerdings immer noch mit bescheidenem Erfolg. Das lag maßgeblich an den zu dieser Zeit verfügbaren Akkus, die den Anforderungen des Kfz-Betriebs nur bedingt genügten. Ein Durchbruch bahnte sich dann aber mit der Erfindung des Li-Ionen-Akkus an. Diese Akkus wurden 1991 von Sony für Videokameras eingesetzt und sind heute Standard in Smartphones, Tablets, Notebooks usw. Die Vorteile der Akkus: Sie haben eine hohe Speicherdichte, keinen Memoryeffekt und geringe Selbstentladung. Der Nachteil ist der höhere Preis, der sich aber bei vielen der genannten mobilen Anwendungen durch die Vorteile rechtfertigt.

In den vergangenen Jahren wurden nun solche Akkus zu größeren Paketen zusammengepackt, sodass sie sowohl von der elektrischen Leistung als auch von der Kapazität für Kraftfahrzeuganwendungen geeignet sind. Eine der ersten, die diese Technik im Fahrzeugbereich zur Serienreife brachte, war die Firma TESLA. Diese baut anerkanntermaßen respektable Elektrofahrzeuge, obwohl die Firma bis dahin kein etablierter Fahrzeughersteller war. Das Modell, TESLA Model S, siehe Bild 2.2, beeindruckt mit Reichweiten von mehreren hundert Kilometern. Die dafür notwendigen Fahrzeugakkus mit entsprechend großer Kapazität bedingen aber einen entsprechend hohen Preis.

**Bild 2.2**

Tesla Model S.

Quelle: Tesla Motors

## ■ 2.2 Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug

Aus einem konventionellen Kraftfahrzeug wird ein Elektrofahrzeug, wenn der mechanische Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor durch einen Antriebsstrang mit Elektromotor ersetzt wird. Dabei gehen die Automobilfirmen in der Konstruktion der Elektrofahrzeuge unterschiedliche Wege: Beim **Purpose-Design** wird um diesen neuen Antriebsstrang ein eigenständig neues Fahrzeug entwickelt. Beispiele hierzu sind der *Nissan Leaf* oder der *BMW i3*, siehe Bild 2.3 und Bild 2.4.

**Bild 2.3**Purpose-Design:  
Nissan Leaf

**Bild 2.4**

BMW i3, Elektrofahrzeug mit innovativem Design. Quelle: BMW Group

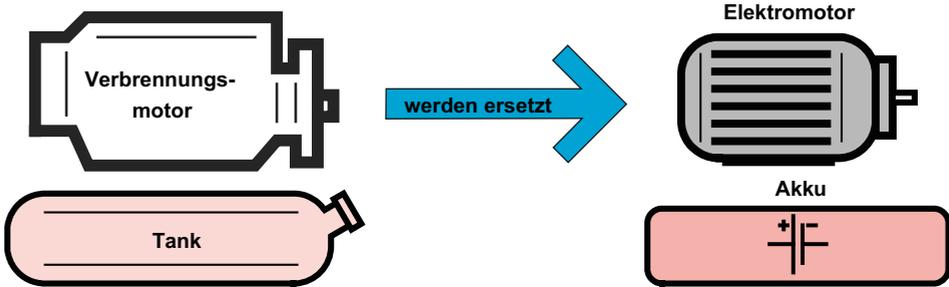
Wird dagegen eine vorhandene Plattform als Basis für die Entwicklung genutzt, spricht man von **Conversion-Design**. Diesen Weg gingen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier wurden beim *smart electric drive*, der B-Klasse (siehe Bild 2.5), dem *e-up* und dem *e-Golf* jeweils vorhandene Plattformen genutzt. Damit sind in der Herstellung zwar entsprechende Synergien nutzbar, aber die konstruktiven Freiheiten werden deutlich eingeschränkt. Dennoch gibt es weiterhin ein wichtiges Argument für das Conversion-Design: Die genutzte Plattform ist so auch für die parallele Entwicklung und Fertigung entsprechender Plug-in-Hybride einfacher nutzbar.

**Bild 2.5**

Beispiel für Conversion-Design: Daimler B-Klasse Electric Drive

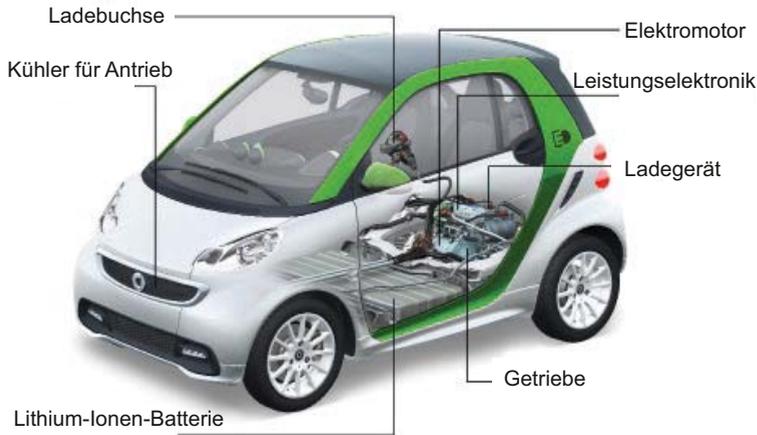
Langfristig allerdings, bei großen Stückzahlen, hat das Purpose-System Vorteile, bietet doch die Elektrifizierung eine Menge neuer Freiheitsgrade, die zur Optimierung des Gesamtfahrzeuges genutzt werden können. Seit 2020 setzt sich der Trend zu eigenen Plattformen für die Elektromobile bei nahezu allen Herstellern durch.

Neben dem angesprochenen Antriebsstrang mit Elektromotor muss noch der Energiespeicher ausgetauscht werden. Das heißt, der konventionelle Kraftstofftank wird ersetzt durch den Akku (Bild 2.6). Dieser nimmt zwar nicht wesentlich mehr Volumen ein, ist aber deutlich schwerer (Anhaltswert: etwa 350 kg Mehrgewicht bei 45 kWh Kapazität). Man nutzt dieses Gewicht, indem man den Akku im Fahrzeugboden anordnet und so für einen tieferen Schwerpunkt und damit mehr Fahrstabilität sorgt.



**Bild 2.6** Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt

Für ein ausgeführtes Fahrzeug, den *smart electric drive*, zeigt sich damit der in Bild 2.7 dargestellte konstruktive Aufbau:



**Bild 2.7** smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku. Quelle: Daimler AG