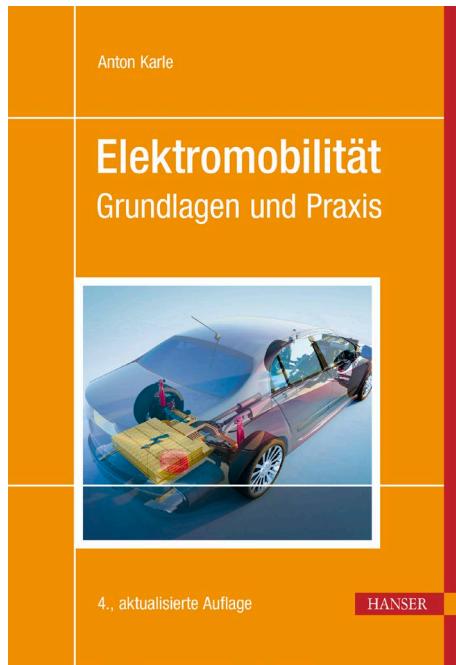


# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Elektromobilität“

Anton Karle

Print-ISBN: 978-3-446-46078-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46077-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46078-2>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Das Jahr 2013 markiert einen Wendepunkt bei der Elektromobilität – zumindest was die öffentliche Wahrnehmung in Deutschland betrifft. Zwar hat die Bundesregierung bereits 2009 das Ziel formuliert, im Jahr 2020 sollen 1 Million Elektrofahrzeuge in Deutschland fahren. Aber erst die bei der **Internationalen Automobil-Ausstellung** im Jahr 2013 vorgestellten bzw. angekündigten Elektrofahrzeuge u. a. von BMW und VW machten deutlich, dass Elektrofahrzeuge keine Nischenprodukte mehr sind, sondern in der Mobilität eine zunehmend wichtige Rolle spielen werden.

Ob das ehrgeizige Ziel, 1 Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen im Jahr 2020 erreicht wird, ist derzeit noch offen. Welche Gründe hauptsächlich für oder gegen solche Fahrzeuge sprechen, lässt sich in wenigen Worten zusammenfassen:

Wesentliche Vorteile sind: Elektroautos sind vor Ort emissionsfrei, haben einen geringen Verbrauch und sind leise. Dem stehen die Nachteile einer derzeit zu geringen Reichweite und eines hohen Anschaffungspreises entgegen. Allerdings lässt sich aus diesen schlaglichtartigen Argumenten noch nicht ableiten, ob Elektromobilität sinnvoll und zukunfts-fähig ist, oder ob es sich – mal wieder – nur um eine Modeerscheinung handelt.

Um das beantworten zu können, ist eine differenziertere Betrachtung erforderlich. Natürlich ist es wichtig, die Antriebstechnik und die derzeitigen Verkaufskosten zu beachten. Jedoch haben weitere Felder einen gravierenden Einfluss auf die künftigen Entwicklungen: Dazu gehört beispielsweise die Frage, woher der Strom für das Aufladen der Akkus kommt. Damit ist man bei einem weiteren Großthema, das eng mit Elektromobilität ver- bunden ist, der sogenannten Energiewende. Denn erst wenn man die Gesamtenergie- bilanz, in Fachkreisen **Well-to-Wheel** (von der Quelle bis zum Rad) betrachtet, kann man fundierte Aussagen über die tatsächliche Umweltfreundlichkeit der Technik machen. Weiter ist zu überlegen, wie es mit der Infrastruktur der „Strom“-Tankstellen derzeit bestellt ist und wie sie sich entwickeln wird.

Wie anfangs angedeutet, spielt auch die Politik eine entscheidende Rolle für die künftige Entwicklung. Nicht nur wegen der erwähnten Zielvorgabe, die begleitet wird von entspre- chenden Fördermaßnahmen. Viel einflussreicher wirken sich entsprechende gesetzliche Vorgaben und Verordnungen aus. Hier wären zu nennen die Bestimmungen zum Flotten- verbrauch und dem dazugehörenden zulässigen CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Fahrzeugflotten der Her- steller. Fachleute sagen, dass die dort festgelegten Grenzwerte ohne eine verbreitete Elek- trifizierung des Antriebsstrangs wohl nicht erreicht werden können. Solche Vorgaben werden nicht mehr nur national bestimmt, sondern von der EU europaweit festgelegt. Ver-

gleichbare Vorschriften gibt es auch in den meisten Nicht-EU-Ländern, in welche die Fahrzeuge der wichtigsten Hersteller verkauft werden. Hier zeigt sich sehr deutlich eine internationale Verflechtung von Politik, Industrie und dem Marktgeschehen.

Und gleichzeitig wandelt sich das gesamte Umfeld in der Autoindustrie. Google – um nur einen Namen beispielhaft für die zunehmende Vernetzung des Autos mit dem Internet zu nennen – hält Einzug in unsere Autos. Dies ist sowohl Chance als auch Herausforderung für die etablierten Fahrzeughersteller.

Diese erste Übersicht der unterschiedlichen Einflussfelder macht deutlich: Man kann mögliche Entwicklungen nur sachgerecht einschätzen, wenn man nicht allein Einzelkomponenten betrachtet, vielmehr muss das gesamte System in seiner Komplexität fundiert analysiert werden.

Die Grundlagen für eine solche Analyse sollen in diesem Buch aufbereitet werden. Neben einem Überblick über die Fahrzeuge, die unter den Begriff „Elektromobilität“ fallen, und den technischen Grundlagen des elektrifizierten Antriebsstrangs, wird der Berechnung der zu erwartenden Verbrauchsvorteile ein Abschnitt gewidmet. Das Laden von Elektrofahrzeugen, einschließlich der notwendigen Infrastruktur, wird ebenso beleuchtet wie die Herkunft und Bereitstellung des Stromes für Elektromobilität. Natürlich werden die Kosten beachtet, wie auch das Marktgeschehen insgesamt. Die politischen Randbedingungen und der Einfluss auf die Umwelt werden dargestellt.

Auf Basis der Grundlagen und aktueller Forschungsarbeiten werden künftige Entwicklungen abgeschätzt. Damit bietet dieses Buch die Möglichkeit, sich einen fundierten Gesamteindruck zu verschaffen. Zudem kann es als Einstiegswerk für die Ausbildung im Bereich E-Mobilität genutzt werden.

Furtwangen, März 2015

*Anton Karle*

## ■ Vorwort zur 4. Auflage

Spätestens seit dem Jahr 2019 ist klar, dass das Ziel der Bundesregierung für 2020 – 1 Million Elektroautos auf Deutschlands Straßen – weit verfehlt wird. Als Ursache ist unter anderem zu erkennen, dass es noch zu wenig bezahlbare E-Fahrzeuge für den Massenmarkt gibt. Zwar werden für die Jahre 2019 und 2020 zahlreiche neue Elektrofahrzeuge mit inzwischen deutlich besserter Reichweite angeboten, häufig aber im höherpreisigen Bereich und mit teils langen Lieferzeiten. Der große Markthochlauf wird daher erst in den Jahren danach stattfinden. Daneben fehlt es derzeit noch an einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur. Vor allem das Problem des Ladens für Fahrer ohne Stellplatz mit Stromanschluss ist allenfalls ansatzweise gelöst.

Auch die breite Öffentlichkeit erkennt mittlerweile die immensen Herausforderungen, vor denen die Automobilindustrie und deren Zulieferer in den nächsten Jahren bei der Transformation zu einer modernen Mobilität und nachhaltigeren Antriebstechnik stehen. Die stark zunehmenden Anforderungen, die mit der strategischen Hinwendung zu Elektromobilen und der durchgreifenden Digitalisierung in den Fahrzeugen entstehen, fördern bei den Fahrzeugherstellern Kooperationen, die bisher in dem Maße nicht denkbar waren.

---

So kooperiert beispielsweise BMW mit Daimler beim Carsharing und beim autonomen Fahren, aber auch die Entwicklung gemeinsamer Plattformen für zukünftige E-Modelle ist im Gespräch. Geplant ist auch eine Zusammenarbeit von Ford und VW, die unter anderem vorsieht, dass Ford künftig Volkswagens Elektrobaukasten MEB nutzt. Auch ist festzustellen, dass China nicht nur als Absatzmarkt, sondern auch als Fertigungsstandort und bei der Zulieferung von Akku-Zellen eine wichtige Rolle spielt.

Die zentrale Rolle der Zellfertigung wird bei Autoindustrie und Politik zunehmend als Kern der Wertschöpfung und als Standortsicherung thematisiert. So soll es eine europäische Zell-Fertigung mit (zunächst) Pilotanlagen in Deutschland und Frankreich geben, VW treibt eine eigene Zellfertigung in Kooperation mit dem schwedischen Batteriehersteller NORTHVOLT voran.

Der Druck nach noch mehr Elektrifizierung steigt gleichzeitig weiter. Werden doch die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw ab 2030 nochmals um 37,5 % verschärft.

Mittlerweile rückt auch der Schwerlastverkehr in den Fokus. Für Lkw und Busse wird es CO<sub>2</sub>-Grenzwerte geben, die wahrscheinlich ohne Elektrifizierung der Antriebsstränge nicht erreicht werden können. Bei diesen Fahrzeugen, und hier besonders beim Schwerlast-Fernverkehr, spielt die Reichweite eine noch viel größere Rolle als bei den Pkw. Es ist aus heutiger Sicht schwer vorstellbar, dass dabei rein batterie-elektrisch betriebene Lkw umsetzbar sind. Lösungsmöglichkeit sehen viele Fachleute im Einsatz von Brennstoffzellen zur Reichweitenverlängerung. Bezieht man mit ein, dass in China eine verstärkte Hinwendung zu dieser Technologie zu beobachten ist, dass es sinnvolle Synergieeffekte mit der Energiewende geben kann (Stichwort „Power-to-gas“) und dass in Deutschland noch eine Technologieführerschaft denkbar ist, so wird deutlich, dass die Diskussion um die Brennstoffzelle in den kommenden Jahren eine herausragende Rolle einnehmen wird!

Furtwangen, Januar 2020

*Anton Karle*

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Überblick Elektrofahrzeuge</b>	<b>19</b>
2.1	Geschichte und grundsätzliche Bedeutung	19
2.2	Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug	20
2.3	Die Vorteile des Elektroantriebs	23
2.4	Die Nachteile des Elektroantriebs	26
2.5	Vorgaben zur CO <sub>2</sub> -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	27
<b>3</b>	<b>Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis</b>	<b>28</b>
3.1	Elektro-Pkw	28
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge	28
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV)	30
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV)	31
3.1.3.1	Mikrohybrid	33
3.1.3.2	Mildhybrid	33
3.1.3.3	Vollhybrid	33
3.1.3.4	Plug-in-Hybrid	34
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride	35
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1	37
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug	38
3.1.3.8	Funktion der Brennstoffzelle	39
3.1.3.9	Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug	39
3.1.3.10	Wasserstoffversorgung	40
3.1.3.11	Wie wird der Wasserstoff produziert?	40
3.1.3.12	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge	41
3.2	Elektrobusse	42
3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge	42
3.4	Elektrofahrräder	43
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern	44
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern	46

---

3.5	Weitere Elektrofahrzeuge .....	47
3.5.1	Segway .....	47
3.5.2	Elektromotorräder .....	49
3.5.3	Elektroflugzeuge .....	50
<b>4</b>	<b>Grundlagen Kfz-Antriebe .....</b>	<b>51</b>
4.1	Übersicht Antriebe .....	51
4.2	Verbrennungsmotor .....	51
4.2.1	Funktion Viertaktmotor .....	52
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungsmotors .....	54
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch .....	56
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen .....	57
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld .....	59
<b>5</b>	<b>Elektrifizierter Antriebsstrang .....</b>	<b>60</b>
5.1	Elektromotor .....	60
5.1.1	Anforderungen .....	61
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren .....	61
5.1.3	Gleichstrommotor .....	61
5.1.4	Drehstrommotor .....	63
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektrofahrzeugen .....	67
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe .....	68
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb .....	70
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs .....	71
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl .....	72
5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung ..	73
5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors .....	74
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft .....	77
5.2	Energiespeicher Akku .....	78
5.2.1	Grundlagen und Begriffe .....	78
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku .....	79
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakkku .....	81
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektrofahrzeugen .....	83
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus .....	85
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS) .....	85
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus .....	87

---

5.2.4	Hersteller .....	87
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Akkus .....	88
5.3	Leistungselektronik, Inverter .....	89
<b>6</b>	<b>Laden und Ladeinfrastruktur .....</b>	<b>91</b>
6.1	Grundlagen Akkuladen .....	91
6.1.1	Die Laderate .....	92
6.1.2	Kapazität des Akkus .....	92
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah) .....	92
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad ..	92
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen .....	93
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus .....	94
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen .....	95
6.2.1	Ladearten und Lademodi .....	96
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer .....	99
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen .....	100
6.2.4	Sicherheit beim Laden .....	102
6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur .....	102
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten .....	105
6.4.1	Induktives Laden .....	105
6.4.2	Wechselakkus .....	106
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid .....	107
6.4.4	Dichte von Ladestationen .....	108
<b>7</b>	<b>Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen .....</b>	<b>109</b>
7.1	Physikalische Grundlagen .....	109
7.1.1	Berechnungsgrößen .....	109
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung .....	110
7.1.3	Energie und Verbrauch .....	112
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände .....	113
7.2	Verbrauchssimulationen .....	116
7.2.1	Einflussgrößen .....	116
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit .....	116
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch .....	117
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch .....	120
7.3	Verbrauch Elektrofahrzeuge im NEFZ .....	124
7.3.1	Der NEFZ-Fahrzyklus .....	124
7.3.2	NEFZ-Verbrauchssimulationen .....	127
7.3.3	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktionsparameter .....	131
7.3.4	NEFZ-Verbrauch bei Plug-in-Hybriden .....	132
7.3.5	Elektrische Reichweite (NEFZ) .....	135
7.3.6	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite .....	136

7.3.6.1	Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen . . . . .	137
7.3.6.2	Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung . . . . .	138
7.3.7	Alternative Messzyklen und Übertragbarkeit der NEFZ- Messwerte auf reale Fahrsituationen . . . . .	139
7.4	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Strom für die Elektrofahrzeuge . . . . .</b>	<b>142</b>
8.1	Energieerzeugung . . . . .	142
8.1.1	Primärenergiequellen . . . . .	142
8.1.2	Der Strommix Deutschland . . . . .	143
8.1.3	Erneuerbare Energien . . . . .	146
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen . . . . .	148
8.1.3.2	Windenergie . . . . .	150
8.1.3.3	Strom aus Biomasse . . . . .	151
8.1.3.4	Wasserkraft . . . . .	153
8.2	Speicherung von Strom . . . . .	155
8.2.1	Speichertechnologien . . . . .	156
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher . . . . .	157
8.2.2.1	Akkumulatoren . . . . .	157
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke . . . . .	158
8.2.2.3	Erdgasspeicher . . . . .	159
8.2.2.4	Power-to-Gas . . . . .	160
<b>9</b>	<b>Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen . . . . .</b>	<b>164</b>
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz . . . . .	164
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge . . . . .	166
9.3	Nutzungsphase . . . . .	167
9.3.1	Lärm . . . . .	167
9.3.2	Luftschadstoffe . . . . .	167
9.3.3	CO <sub>2</sub> -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs . . . . .	168
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen . . . . .	170
<b>10</b>	<b>Markt . . . . .</b>	<b>174</b>
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge . . . . .	174
10.1.1	Anzusetzende Kosten . . . . .	174
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor- Fahrzeug . . . . .	175
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung . . . . .	179
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen . . . . .	179
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge . . . . .	181
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw . . . . .	182
10.2.2.2	Plug-in-Hybride . . . . .	190

---

10.2.2.3 Nutzfahrzeuge .....	192
10.2.2.4 Brennstoffzellenfahrzeuge .....	194
10.3 Wirkung staatlicher Förderung .....	195
10.4 Schlussfolgerungen Markt .....	197
<b>11 Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen .....</b>	<b>198</b>
11.1 Carsharing .....	198
11.1.1 car2go .....	198
11.1.2 DriveNow .....	200
11.1.3 Carsharing im ländlichen Raum .....	201
11.2 E-Taxis .....	201
11.3 Elektrobusse .....	202
11.4 Güterverkehr .....	203
11.4.1 Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen .....	203
11.4.2 Elektro-Lkw .....	205
<b>12 Förderung der Elektromobilität in Deutschland .....</b>	<b>206</b>
12.1 Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte .....	206
12.2 Schaufenster für Elektromobilität .....	208
12.3 NPE-Fortschrittsberichte 2014 und 2018 .....	208
<b>13 Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung .....</b>	<b>211</b>
<b>14 Berechnungen .....</b>	<b>213</b>
14.1 Aufgaben .....	213
14.2 Workshop Simulation .....	219
<b>■ Glossar .....</b>	<b>224</b>
<b>■ Verzeichnis Bildquellen .....</b>	<b>227</b>
<b>■ Literatur .....</b>	<b>229</b>
<b>■ Index .....</b>	<b>233</b>

# 1

## Einführung

### Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

Unter Elektromobilität versteht man den Personen- und Güterverkehr mittels Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden. Strenggenommen zählt dazu auch die Eisenbahn, die in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Schwerpunktmaßig 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.

Seit der **Internationalen Automobil-Ausstellung 2013**, auf der BMW mit dem *i3*, VW mit dem *e-up* und dem für 2014 angekündigten *e-Golf* reine Elektrofahrzeuge präsentiert haben, gilt die Aussage, dass mittlerweile nahezu alle namhaften Automobilhersteller serientaugliche Elektrofahrzeuge im Programm haben.

Die Alltagstauglichkeit solcher Fahrzeuge wurde 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 so genannten Plug-in-Hybriden, die sowohl mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor ausgestattet sind als auch mit Elektroantrieb und Akku. Mit diesen Fahrzeugen können Kurzstrecken bis typischerweise 50 km rein elektrisch gefahren werden. Für größere Reichweiten kommt dann der konventionelle Antrieb zum Einsatz.

### **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 ausreichend verfügbar. Die von der Bundesregierung ursprünglich angestrebten 1 Million Elektrofahrzeuge, die 2020 auf deutschen Straßen fahren sollen, benötigen nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt nur 0,3 % des derzeitigen deutschen Strombedarfs. Das entspricht weniger als der Hälfte des jährlichen Zuwachses an regenerativem Strom.

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. Zwar kommen sie derzeit auch im Realbetrieb schon auf Werte über 150 km, ein 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 derzeit eine Infrastruktur aufgebaut, die bei längeren Fahrten ein Zwischenladen an öffentlichen Stromladesäulen in vertretbarer Zeit ermöglichen soll.

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 läuft der Verkauf noch eher schleppend.

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

Es gibt viele Untersuchungen, die vorhersagen, dass die Begrenztheit des Erdölangebots zunehmen wird. Wenn in Ländern wie Indien und China die Motorisierung ansteigt, wie es heute ja schon zu beobachten ist, wird dies neben einem steigenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu einer weiteren Verknappung der Ressourcen führen. Und somit zu steigenden Benzinpreisen. Gleichzeitig ist heute aber auch schon abzusehen, dass die Kosten für die teuren Akkus in den nächsten Jahren deutlich sinken werden, so dass sich die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen zu Gunsten des E-Mobils verbessert.

Verbessern wird sich durch die technische Entwicklung weiterhin die Reichweite. Aber sie wird, soweit das heute abschätzbar ist, auch in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten nicht in den Bereich heutiger Benzin- oder Dieselautos kommen. Diesbezüglich wird ein E-Fahrzeug ein herkömmliches Fahrzeug nicht ersetzen können. Aber es gibt inzwischen (und es wird mehr geben) viele 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 realistische Kostenberechnungen erstellt.

Mit diesen Grundlagen kann ein Vergleich der zwei Systeme, Elektrofahrzeuge und Otto- bzw. Dieselfahrzeuge, sachgerecht durchgeführt werden. Auf dieser Basis 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 Fahrzeuge als Konkurrenz zu den herkömmlichen Verbrennungsmotor-Kraftfahrzeugen mit 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 Vorderrädern, 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 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, so dass sie sowohl von der elektrischen Leistung als auch von der Kapazität für Kraftfahrzeugeanwendungen geeignet sind. Eine der ersten, die diese Technik im Fahrzeubereich zur Serienreife brachte, war die Firma TESLA. Diese baut anerkanntermaßen respektable Elektrofahrzeuge, obwohl die Firma bis dahin kein etablierter Fahrzeugherrsteller war. Das aktuelle 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 Bilder 2.3 und 2.4.



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



**Bild 2.4** BMW i3, Elektrofahrzeug mit innovativem Design. Quelle: BMW Group.

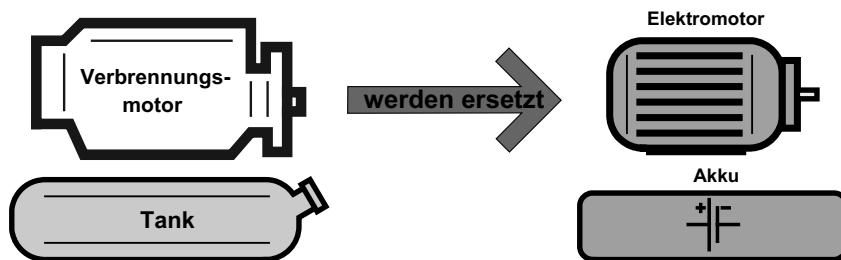
Wird dagegen eine vorhandene Plattform als Basis für die Entwicklung genutzt, spricht man von **Conversion-Design**. Diesen Weg gingen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier wurden beim *smart electric drive*, der B-Klasse (siehe Bild 2.5), dem *e-up* und dem *e-Golf* jeweils vorhandene Plattformen 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

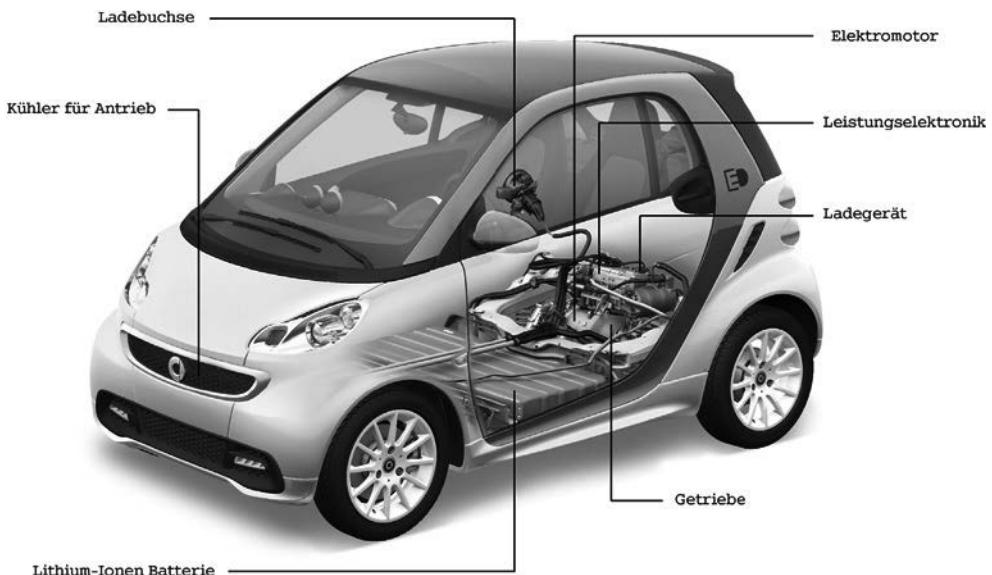
Langfristig allerdings, bei großen Stückzahlen, hat das Purpose-System Vorteile, bietet doch die Elektrifizierung eine Menge neuer Freiheitsgrade, die zur Optimierung des Gesamtfahrzeuges genutzt werden können.

Neben dem angesprochenen Antriebsstrang mit Elektromotor muss noch der Energiespeicher ausgetauscht werden. Das heißt, der konventionelle Kraftstofftank wird ersetzt durch den Akku. Dieser nimmt zwar nicht wesentlich mehr Volumen ein, ist aber deutlich schwerer (etwa 250 kg Mehrgewicht). Man nutzt dieses Gewicht, indem man den Akku im Fahrzeugsboden anordnet und so für einen tieferen Schwerpunkt und damit mehr Fahrstabilität sorgt, wie in Bild 2.6 dargestellt.



**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

## ■ 2.3 Die Vorteile des Elektroantriebs

### Der Elektroantrieb ist energieeffizient

Elektromotoren, wie sie in Elektrofahrzeugen verwendet werden, wandeln elektrische Energie sehr effektiv in mechanische Antriebsenergie um. Sie weisen Wirkungsgrade im nahezu gesamten Arbeitsbereich von mehr als 90 % auf. Verbrennungsmotoren dagegen kommen nur auf maximal 40 %. Und das auch nur in einem sehr eingeschränkten Drehmoment-Drehzahlbereich. In den anderen Betriebsbereichen sinkt der Wirkungsgrad beträchtlich. Weiterhin können Elektromotoren beim Bremsen des Fahrzeugs elektronisch in einen Generatorbetrieb geschaltet werden, so dass die entstehende Bremsenergie genutzt werden kann, um den Akkumulator aufzuladen. Diese sogenannte „**Rekuperation**“ bedingt in Verbindung mit den hohen Wirkungsgraden einen deutlich geringeren Energieverbrauch der Elektroautos im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen, was entsprechend geringe Betriebskosten zur Folge hat. Außerdem ist der Elektromotor wegen seines im Vergleich zum Otto- oder Dieselmotor relativ einfachen konstruktiven Aufbaus weitgehend verschleiß- und wartungsfrei.

### Der Elektroantrieb ist vor Ort emissionsfrei

Im Fahrbetrieb emittiert das Elektroauto vor Ort keine nennenswerten Schadstoffe. Reine Elektrofahrzeuge werden daher als „**Zero Emission Vehicle**“ (ZEV) eingestuft, gemäß

dem strengen Abgasstandard der **CARB**-Gesetzgebung des US-amerikanischen Bundesstaates Kalifornien. CARB, California Air Resources Board, ist eine Regierungskommission des Bundesstaates Kalifornien. Dieses Beratungsgremium ist bekannt für seine besonders strengen Gesetzesvorschläge zur Luftreinhaltung. Auch nach den Richtlinien der Europäischen Union tragen Elektrofahrzeuge nicht zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Fahrzeugflotte bei.

Allerdings gilt diese Emissionsfreiheit nur bei örtlicher Betrachtung. Grundsätzlich muss aber bei der Schadstoffbelastung die **Stromerzeugung** für die Fahrzeuge in die Beurteilung miteinbezogen werden. Aber auch bei Betrachtung der gesamten Energiekette (von Erzeugung bis Verbraucher = „Well-to-Wheel“-Betrachtung) produzieren die E-Fahrzeuge weniger Schadstoffe als herkömmliche Fahrzeuge. Im Idealfall, wenn zum Aufladen regenerativ erzeugter Strom verwendet wird, hat das E-Fahrzeug auch bei der Gesamtbetrachtung keine nennenswerten Emissionen.



Die Betrachtung der örtlichen Emissionen eines Fahrzeugs wird als „**Tank-to-Wheel**“ (vom „Tank zum Rad“)-Beurteilung bezeichnet. Auch wenn E-Fahrzeuge keinen Tank im eigentlichen Sinne haben, hat sich diese Bezeichnung für die örtliche Betrachtung durchgesetzt.

Wird auch die Energieerzeugung mit einbezogen, spricht man von „**Well-to-Wheel**“ (von der „Quelle zum Rad“)-Beurteilung.

## **Elektroantriebe haben ab den ersten Umdrehungen ein hohes Drehmoment und überdecken einen großen Drehzahlbereich**

Durch diese Eigenschaften werden ein herkömmliches Schaltgetriebe und eine Schaltkupplung überflüssig. Lediglich ein einstufiges Untersetzungsgetriebe zur Drehzahlanpassung ist erforderlich. Im Fahrbetrieb folgt daraus ein absolut ruckfreies Fahren über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Durch das hohe Drehmoment der Elektromotoren schon bei kleinster Drehzahl lassen sich Elektrofahrzeuge aus dem Stand heraus mit hohen Beschleunigungswerten anfahren. Das bisher gewohnte notwendige Schleifenlassen der Kupplung und das mehrmalige Schalten entfallen vollständig. Elektrofahrzeuge zeichnen sich daher durch das Potential für eine sehr dynamische Fahrweise aus. Und durch einen Fahrkomfort, der bei heutigen Fahrzeugen selbst mit Automatikgetriebe so nicht gegeben ist.

## **Elektroantriebe sind leise**

Die im Vergleich zum Verbrennungsmotor sehr niedrige Lautstärke der Elektromotoren führt im Fahrzeug, selbst beim Fahren mit höheren Geschwindigkeiten, zu einer angenehm ruhigen Geräuschkulisse für Fahrer und Insassen. Auch außerhalb des Fahrzeugs tragen die niederen Fahrgeräusche, insbesondere bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten, zu einer Verbesserung der Lebensqualität von Anwohnern und anderen Straßennutzern bei. Bei hohen Geschwindigkeiten ist der Effekt wegen der zunehmenden Abrollgeräusche noch gegeben, aber nicht mehr so durchschlagend.

Innerorts, bei den vorherrschenden geringen Geschwindigkeiten, kann das niedrige Geräuschniveau sogar dazu führen, dass diese Fahrzeuge nicht oder zu spät von Fußgängern

und Radfahrern wahrgenommen werden, so dass kritische Situationen entstehen können. Daher müssen ab Juli 2021 alle neu zugelassenen elektrifizierten Pkw ein Warngeräusch von sich geben. Die dafür benötigte Technik „Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS)“ muss bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h aktiv sein.

### **Reine Elektrofahrzeuge haben einen einfachen Aufbau und lassen sich leichter regeln**

Im Vergleich zu Verbrennungsmotor-Fahrzeugen haben Elektroautos einen deutlich einfacheren Aufbau. Bei vergleichbarer Leistung ist ein Elektromotor leichter und kompakter, und er ist weitgehend wartungsfrei. Elektromotoren lassen sich elektrisch leichter regeln, selbst das Umschalten von Vorwärts- in Rückwärtsbewegung erfolgt ohne Schaltgetriebe allein auf elektronischem Wege.

Im Gegensatz dazu erfordern bei Verbrennungsmotoren allein schon die Regelung von Kraftstoffmenge und Zündzeitpunkt unter Beachtung einer sauberen Verbrennung die ganze Ingenieurkunst der Autohersteller. Allerdings darf nicht übersehen werden, dass Elektroantriebe wegen der zu steuernden hohen Spannungen und Ströme eine aufwendigere Steuerungselektronik benötigen, als dies bei herkömmlichen Fahrzeugen der Fall ist.

Dafür entfallen bei den reinen Elektrofahrzeugen neben dem erwähnten Schaltgetriebe und der Kupplung noch eine Reihe weiterer Zusatzbaugruppen, wie

- Tank, Benzinpumpe
- Öltank, Öl
- Katalysator
- Auspuffsystem
- Anlasser, Lichtmaschine, Starterbatterie

Andere Bauteile, beispielsweise die Bremsen, werden durch die Bremsunterstützung, der Rekuperation, deutlich weniger beansprucht, was sich durch eine längere Lebensdauer der Bremsbeläge positiv bemerkbar macht. In der Summe dieser Unterschiede verringern sich der Service-Aufwand und die Service-Kosten deutlich. Und zuletzt bedingt der einfache Aufbau eine verbesserte Recyclingmöglichkeit des Fahrzeugs am Ende seiner Lebensdauer.



Elektrofahrzeuge bieten einen hohen Fahrkomfort und haben günstige Betriebskosten. Sie sind vor Ort emissionsfrei und CO<sub>2</sub>-neutral, wenn regenerativ erzeugter Strom zum „Tanken“ genutzt wird.

# Index

## A

Abbremsen 123  
Abhol- und Abgabestation 201  
Abrechnungsmodalitäten 102  
Abrechnungssystem 102  
Abwärme 137  
AC-Laden 100  
AC-Schnellladung 102  
ADAC-Autobahnzyklus 140  
ADAC ECOTest 140  
Akku 78  
- Kosten 177f.  
- Wechsel 43, 106  
- Zellfertigung 209  
aktiver Bremswiderstand 113  
Alterung 85  
amorpher Kohlenstoff 79  
Amperestunden 92  
Anfangsbeschleunigung 220  
Angebot Elektrofahrzeuge 181, 211  
Anschaffungskosten 174  
Anschaffungspreis 26, 176  
Antriebsakkus 85  
Antriebsenergie 112  
Antriebskonzepte 113  
Antriebskraft 72, 76, 110, 116  
Antriebsmoment 76, 110  
Antriebsstrang 22  
Asynchronmaschine 63  
Asynchronmotor 61, 65  
Auslassventil 53  
Ausrollversuche 126  
Automatikgetriebe 24

Batteriegehäuse 82  
Batterieherstellung 166  
Batterie-Management-System 46, 85, 95  
Batteriewechsel 43  
battery electric vehicles 78  
Beschleunigung 110  
- Berechnungen 141  
- Bilanz 134  
- Flottenausstoß 134  
- Kraft 110  
- Messungen 135  
- Profil 120  
- Reibung 121  
- Simulationen 116  
- Wert 125, 129  
- Widerstand 118  
Bestpunkt 55  
Bestpunkt-Drehzahl 57  
Betriebskosten 26, 174 ff.  
Betriebsszenarien 119  
Bilanzierungsregeln 146  
Bildung und Qualifizierung 209  
Bioethanol-Betrieb 139  
Biogasanlagen 151f.  
Biomasse 151f.  
Bleiakkus 19  
Blockheizkraftwerke 152  
Braunkohle 146  
Bremse 114  
Bremsenergie 39, 128  
Brennstoff 139  
Brennstoffzelle 39  
Brennstoffzellenfahrzeug 38, 163, 194  
Brennstoffzellen-Hybridbus 42  
Bruttostromerzeugung 143

## B

Ballungsräume 139  
Batterieelektrische Fahrzeuge 28

**C**

car2go 198  
 Carbon Footprint 164  
 Carsharing im ländlichen Raum 201  
 Carsharing-Konzepte 199  
 CCCV-Ladeverfahren (Constant Current, Constant Voltage) 94  
 CCS-Ladedose 101  
 CCS-System 188  
 CHaDemo 96  
 CHAdeMO-System 101  
 Chamäleon Ladesystem 185  
 Citaro Fuel-Cell-Hybrid 41  
 CO<sub>2</sub>  
 - Ausstoß 27, 212  
 - Bilanz 134, 164, 167  
 - Flottenausstoß 134  
 - Grenzwerte 27  
 - Reduktion 27  
 Coefficient of Performance 139  
 Combined Charging System (CCS) 96, 101  
 Combo-2-Stecker 101  
 Combo-System 98  
 Conversion-Design 21  
 Coulomb-Wirkungsgrad 92  
 Crashtests 87  
 cw-Wert 131

**E**

E-Bikes 44  
 Eckdrehzahl 69  
 Effizienz des Elektroantrieb 130  
 e-gas 162  
 Einsparpotential 130  
 Einspritzzeitpunkt 53  
 elektrifizierter Antriebsstrang 60  
 elektrische Reichweite 134 f.  
 elektrische Speicher 156  
 Elektroantrieb 17  
 Elektrobusse 42  
 Elektrobusverkehr 202  
 elektrochemische Speicher 156  
 Elektrofahrräder 43  
 Elektrofahrzeuge 15, 17  
 Elektroflugzeuge 50  
 Elektroinfrastruktur 96  
 Elektro-Lkw 205  
 Elektrolyse 39, 160  
 Elektromagnet 62  
 Elektromotor 60  
 Elektromotorräder 49  
 Elektro-Pkw 28  
 Elektro-Scooter 49  
 energetische Amortisationszeit 165  
 Energiebilanz 56, 122  
 Energie des Kraftstoffs 56  
 Energiedichte 81, 84  
 Energieeffizienz 31, 90  
 Energieerhaltungssatz 71, 74  
 Energiegehalt 56, 129  
 Energiespeicher 31, 78, 107, 133, 156  
 Energieverbrauch 17, 113, 119  
 Energiewandler 31  
 Energiewende 211  
 Entlade-Schlussspannung 94  
 Entsorgung 166  
 Erdgas (CNG)-Motoren 51  
 Erdgasfahrzeuge 161  
 Erdgasspeicher 159  
 Erdölangebot 18  
 Erhaltungsaufwendungen 174  
 erneuerbare Energien 143, 147  
 Erneuerbare-Energien-Richtlinie 147  
 Erntefaktor 165  
 Erzeugungskosten 155  
 E-Taxis 201  
 EU-Ladestecker 100  
 EU-Strommix 171  
 Eutrophierung 165

**D**

Dauerleistung 68  
 Dauermagneten 62  
 DC-High-Ladung 98, 101  
 DC-Low-Ladung 98  
 Dieselmotor 51, 55  
 Differenzial 71  
 Differenzialgetriebe 29  
 Direkteinspritzer 53  
 Drehbeschleunigung 109  
 Drehmassen 112  
 Drehmassenzuschlagsfaktor 115  
 Drehstrom 67  
 Drehstrommotor 63, 67  
 Drehstromnetz 28  
 Drehzahlbereich 69  
 Drehzahl-Drehmomentverhalten 68  
 Drehzahl- und Drehmomentsteuerung 61  
 DriveNow 198, 200  
 Druckleitungen 158  
 dynamisches Kräftegleichgewicht 110  
 dynamisches Verhalten 219

**F**

Fahrkomfort 29  
 Fahrmodus 46  
 Fahrprofil 141  
 Fahrstabilität 22  
 Fahrwiderstand 110  
 Fahrwiderstandskurven 118  
 Fahrzeugakku 78  
 Fahrzeugbeschleunigung 77, 115  
 Fahrzeugbremse 121  
 Fahrzeugelektronik 89  
 Fahrzeugflotten 106  
 Fahrzeugheizung 26  
 Fahrzeugklassen 124  
 Fahrzeugmasse 132  
 Fahrzeugplattform 188  
 Fahrzeugsrale 105  
 Fahrzyklus 124  
 F-Cell-Modell 41  
 Feinstaubbelastung 168  
 FI-Schalter 102  
 Fixkosten 174  
 Flotten-Grenzwert 146  
 Flottenverbrauch 212  
 Flottenwert 169  
 Fördermaßnahmen 108  
 Fördermittel 196  
 Förderprogramm 206  
 Formel 1 37  
 Forschungsthemen 206  
 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten 206, 209  
 fossile Energiequellen 142  
 Free-floating-Konzept 201  
 free floating system 200  
 Frequenz 67  
 Frontmotor 44

**G**

Garantiebedingungen 85  
 Gasinfrastruktur 160  
 Gaskraftwerke 160  
 Gasmotoren 159 f.  
 Gasmotor-Generator-Kombination 152  
 Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität (GGEMO) 206  
 Genehmigung 124  
 Generator 29, 35  
 Generatorbetrieb 23  
 Geräuschemissionen 198  
 Gesamtintegration 88

Gesamtreichweite 46  
 Gesamtverbrauch 133  
 Gesamtwirkungsgrad 141  
 Geschäftsmodelle für Elektromobilität 208  
 Geschwindigkeitsbereich 69  
 Getriebeabstimmungen 69  
 Getriebeübersetzung 73  
 Gewicht 131  
 Gigafactory 88  
 Gleichstrom-Ladestationen 98  
 Gleichstrommotoren 61  
 Gleichstrom-Schnellladern 96, 188  
 Global Warming Potential 164  
 Graphen 89  
 Graphit 79  
 Güterverkehr 42, 192, 203

**H**

Halbleitermaterial 90  
 Haushaltssteckdose 99  
 Heckmotor 45  
 Heizleistung 137 f.  
 Heizung 136, 201  
 Herstellung 171  
 Hochdrucktanks 39  
 Hochdruck-Wasserstofftank 194  
 Höchstdrehzahl 72  
 Hochtemperaturelektrolyse 41  
 Hochvoltbatterien 29  
 Hybridantriebe 51  
 Hybridfahrzeuge 31  
 Hybridisierung 32, 212  
 Hybridmotor 66

**I**

In-Cable Control-Box (ICCB) 97  
 Induktion 65  
 induktives Laden 105  
 Infrastruktur 18, 95  
 Innenwiderstand 79, 93  
 innovatives Design 183  
 Intermodalität 208  
 Inverter 29, 89  
 Isolation 138

**K**

Kapazität 91  
 Kastenwagen 193  
 Kaufprämie 196

Kenndaten Plug-in-Hybride 190  
 KERS 37  
 Kfz-Antriebe 51  
 kinetische Energie 122  
 Klimaanlage 136  
 Klimaschädlichkeit 168  
 Klimatisierung 82, 138  
 Kollektor 63  
 Kommunikationsmodul 98  
 Kommutator 62  
 Kompaktklasse 116, 129  
 Komponententests 87  
 konduktives Laden 105  
 konventionelle Kraftwerke 155  
 kostenloses Parken 196  
 Kosten Plug-in Hybride 177  
 Kräftegleichgewicht nach d'Alembert 118  
 Kraftfahrt-Bundesamt 169, 180  
 Kraftstoffeinsparungen 34  
 Kraftstofftank 22  
 Kraftstoffverbrauch 34  
 Kraft-Wärmekopplung 152  
 Kraft-Wärmekopplungstechnik 159  
 Kraftwerkspark 143  
 Kreisfrequenz 72  
 Kühlbedarf 139  
 kumulierter Energieaufwand 165  
 Kurbelwelle 52 f.  
 Kurbelwellen-Startergenerator 33

## L

Ladearten 96  
 Ladegeräte 29, 90  
 Lade-Gleichspannung 90  
 Ladeinfrastruktur 196, 201  
 Ladekabel 91, 95, 98  
 Ladekontrolle 86  
 Ladeleistung 99  
 Lademodi 96  
 Laderate 92  
 Laderaumvolumen 193  
 Ladesäulen 211  
 Ladeschlussspannung 85, 94  
 Ladespule 105  
 Ladestationen 108  
 Ladestrom 80  
 Ladeszenarien 99  
 Lade- und Entladekurve 92  
 Ladeverfahren 93  
 Ladeverluste 136  
 Ladevorgang 85  
 Ladezyklen 80, 88

Lärm 167  
 Lastanhebung 57  
 Lastmanagement 86  
 Lastspitzen 156  
 Laufwasserkraftwerke 153  
 Lautstärke 24  
 Lebensdauer 85, 175  
 Lebenszyklus 166  
 Leerlaufdrehzahl 69  
 Leichtbaumaterialien 183  
 Leistungselektronik 89  
 Leistungsverlauf 128  
 Leistungsverzweigter Hybrid 36  
 Leistungszahl 139  
 Leitanbieter 209  
 Leitanbieter Elektromobilität 206  
 Leitmarkt 209  
 Leitmarkt Elektromobilität 206  
 Leuchtturmprojekte 206 f.  
 Li-Ionen-Akku 20  
 Li-Luft-Akku 89  
 Lithium-Ionen-Akku 51, 78  
 Lohner-Porsche 19  
 lokal emissionsfreie Fahrzeuge 168  
 Luftschadstoffe 167  
 Luftwiderstand 77, 111, 118  
 Luftwiderstandsbeiwert 131

## M

Magnetfeld 63, 65  
 Marktdynamik 209  
 Markthochlaufphase 209  
 Marktvorbereitung 208  
 Mautgebühren 196  
 maximales Drehmoment 69, 116  
 mechanische Antriebsenergie 23  
 mechanische Nutzarbeit 56  
 mechanischer Antriebsstrang 130  
 mechanische Speicher 156  
 Mehrwertsteuer 196  
 Memoryeffekt 79, 94  
 Messzyklen 133  
 Methangas 151  
 Methanisierung 161  
 MGU-H 37  
 MGU-K 37  
 Mikrohybrid 33  
 Mildhybrid 33  
 Mischhybrid-Struktur 35  
 Mittelmotoren 45  
 Mobilitätskonzepte 198  
 Mode-4-Gleichstromladung 101

Modellbildung 219  
 Modellrechnungen 18  
 Modul 81  
 Momentengleichgewicht 75  
 Motor  
 - Auslegung 71  
 - Drehmoment 55, 57  
 - Geräusch 167  
 - Leistung 59  
 - Reibung 121  
 multimodales Verkehrssystem 16  
 Muschel-Diagramm 55

**N**

nachhaltige Mobilität 146, 212  
 nachwachsende Rohstoffe 152  
 Näherungslösung 221  
 Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität 15 f., 146, 198, 206  
 Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 40  
 Natrium-Nickelchlorid-Batterie 78  
 NEFZ 124, 133  
 NEFZ-Verbrauch 132  
 Nennkapazität 136  
 Netzstörungen 156  
 Neuer Europäischer Fahrzyklus 124  
 Neuwagenflotte 168  
 Neuzulassungen 196  
 Newton'sches Gesetz 109  
 Nickel-Metallhydrid-Akku 78  
 Niederspannungs-Bordnetz 89  
 Nippon Charge Service 104  
 Nockenwelle 53  
 Nullemissionsfahrzeuge 168  
 Nutzfahrzeuge 42, 192  
 Nutzungsdauer 174  
 Nutzungsfrequenz 108  
 Nutzungssphase 164  
 nutzungsverhalten 157

**O**

Offshore-Anlagen 151  
 Ökobilanz 164, 170 f.  
 Ökosysteme 165  
 Ölressourcen 146  
 ÖPNV-Angebote 201  
 Ottomotor 19, 51, 55

**P**

Paketzustellung 203  
 parallele Struktur 35  
 Pedal Electric Cycle 43  
 permanentmagneteregte Synchronmotoren 64  
 Photoelektrischer Effekt 148  
 Photovoltaik 148  
 Photovoltaik-Anlagen 149  
 Pkw-Kaufsteuer (BPM) 196  
 Planetengetriebe 74  
 Plug-in-Hybride 17, 34, 134, 211  
 Polymer 80  
 Pouch-Zellen 82  
 Power-to-Gas 160  
 Primärenergiequellen 142  
 Prinzip von d'Alembert 109  
 prismatische Zellen 82  
 Proton exchange membrane fuel cell 39  
 Prüffahrzeug 126  
 Prüfstelle 171  
 Prüfzyklus 126  
 PTC 138  
 Pufferung 157  
 Pumpspeicherkraftwerke 153, 158  
 Purpose-Design 20  
 Purpose-System 22

**Q**

Querschnittsfläche 131

**R**

Radnabenmotoren 19, 67  
 Rahmenbedingungen 196  
 Range Extender 30, 35  
 Range-Extender-Motor 30  
 Realfahrten 140  
 Real-Reichweite 136  
 Recycling 70, 166  
 Regelbarkeit 63  
 Regelung Nr. 101 124  
 Regelung Nr. 101 (ECE R101) 133  
 regenerativ erzeugter Strom 17  
 Reibung 77, 111  
 Reibungsverluste 114  
 Reichweite 18, 84, 211  
 Reichweitenverlängerung 31  
 Reichweitenverminderung 138  
 Reichweite von Elektrofahrrädern 46  
 Reifen-Fahrbahngeräusche 167  
 Rekuperation 23, 29, 34, 61, 114, 120, 128

Restkapazität 123  
 Restwert 176  
 Rollreibung 118  
 Rotation 71, 109  
 Rotor 61  
 Rückgewinnung von Energie 114  
 Rundzellen 82

## S

Schadstoffbelastung 167  
 Schadstoffe 24  
 Schaltgetriebe 24  
 Schaltkupplung 24  
 Schaufenster Elektromobilität 208  
 Schleifkontakte 63  
 schnelle Pedelecs 43  
 Schnelllademöglichkeit 211  
 Schrittweite 77  
 Schubbetrieb 114  
 Schutzschaltung 94  
 schwarzstartfähig 158  
 Second Life 157  
 Segway 47  
 Selbstentladung 79  
 Selbstzündung 53  
 serielle Struktur 35  
 Service-Aufwand 25  
 Service-Kosten 25  
 Sicherheit 85, 87  
 Sicherheitsüberwachung 86  
 Silizium 88  
 Siliziumkarbid 90  
 Simulation 112, 129, 219, 222  
 SLAM 103  
 smart grid 157  
 Solarstrom 149  
 Solarzellen 139  
 Sommersmogpotential 165  
 Speicherbecken 158  
 Speicherseen 154  
 Speichertank 40  
 spezifischer Kraftstoffverbrauch 54  
 Spitzenschwankungen 157  
 staatliche Förderung 195  
 Stadtfahrzeug 186  
 Startdrehzahlen 69  
 Starterbatterie 33  
 Startergenerator 33  
 Start-Stopp-Automatik 33, 125  
 stationsunabhängiges Carsharing 199  
 Stator 61  
 Staustufen 153

Steckverbindung 100  
 Steckvorrichtung 98  
 Steigung 111  
 Steigungswiderstand 77, 118  
 Steuer 175  
 Steuererleichterungen 196  
 Steuerungselektronik 25  
 Stirnradgetriebe 74  
 Stopzzeiten 125  
 Strafzahlungen 169  
 Strahlungswärmeeintrag 138  
 Stromangebot 212  
 Strombedarf 155  
 stromerregte Synchronmotoren 64  
 Stromerzeugung 24, 155  
 Strommarkt 155  
 Strommix Deutschland 143  
 Stromspeicher 157  
 Stromtankstellen 40  
 Stromüberschuss 155  
 Stromversorger 155  
 Subventionsprogramm 196  
 Supercharger 103  
 Supercredits 169  
 Synchronmaschine 63  
 Synchronmotor 61, 63, 66  
 synthetisches Gas 161  
 Systemkosten 88  
 Systemleistung 178

## T

Tank-to-Wheel 24  
 Tank-to-Wheel-Betrachtung 142  
 Tankvorgang 40, 194  
 Terrestrische Solarkonstante 149  
 thermische Massen 138  
 Tiefentladen 81  
 Tiefentladungspunkt 85  
 Toleranzausgleich 82  
 Total Cost of Ownership 174  
 Trägheitskraft 77  
 Translation 71, 109  
 Translationsbeschleunigung 109  
 Translations-Energie 111  
 Treibhaus-Effekt 139  
 Treibhausgase 164  
 Treibhauspotential 164  
 Tretlagermotor 45  
 Turbinen 153  
 Typ 2 100  
 Typ-2-Stecker 100  
 Typen für Steckverbindungen 100

**U**

Überlastschutz 102  
 Überschussstrom 160  
 UMBReLa 166  
 Umfangsgeschwindigkeit des Rades 73  
 Umrichter 29  
 umrichtergespeister Drehstrommotor 29  
 Umweltbelastung 142  
 Umweltbilanz 164  
 Umweltmanagement 165  
 Untersetzungsgetriebe 24, 29  
 Untertagespeicher 159

**V**

Vehicle to Grid 107  
 Verbrauch  
 - Berechnungen 145  
 - Kennfeld 54f., 57  
 - Messungen 124, 126, 132  
 - Simulationen 116  
 - Vorteile 54  
 - Wert 129, 134  
 Verbrauchsangabe 126  
 Verbreitung von Elektrofahrzeugen 174, 179  
 Verbrennungsgase 53  
 Verbrennungsmotor 17, 19, 51  
 Verdichtung 53  
 Vereinte Nationen 126  
 Verfügbarkeit 157  
 Vergleichsfahrzeug 170  
 Verluste 122  
 Versauerungspotenzial 165  
 Verschleißreparaturen 174  
 Verwertungsphase 164  
 Verzögerungsphasen 125  
 Viertaktmotor 52  
 Viertakt-Zyklen 53  
 Vollhybrid 33  
 Vorkonditionierung 139  
 Vor-Ort-Betrachtung 168

**W**

Wachstum 180  
 Wallbox 97  
 Wärmepumpe 139  
 Wärmeregelsystem 126

Wärmetauscher 138  
 Wärmeverluste 93  
 Warngeräusche 25  
 Wartungs- und Werkstattkosten 174f.  
 Wasserkraft 153  
 Wasserkraftwerke 154  
 Wasserstoff 38f., 160  
 Wasserstoffgewinnung 40  
 Wasserstofftankstellen 40  
 Wattstunden 92  
 Wechselakkus 30, 106  
 Wechselrichter 29, 148  
 Wegfahrsperrre 102  
 Weiterentwicklung Akkus 88  
 Well-to-Wheel 24  
 Well-To-Wheel-Betrachtung 140  
 Werkstattkosten 176  
 Wertverlust 175  
 Widerstandskurven 117  
 Wiederverwendung 166  
 Windanlagen an Land 151  
 Windeinflüsse 126  
 Windenergieanlagen 150  
 Wirkungsabschätzungen 165  
 Wirkungsgrad 57, 130  
 Wirtschaftlichkeit 18, 108  
 Wirtschaftskommission für Europa 124  
 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) 126, 140

**Z**

Zeitschritte 222  
 Zellenherstellung 87  
 Zentralmotoren 67  
 Zero Emission Vehicle 23  
 Zugangsberechtigung 102  
 Zulassungszahlen 169, 196  
 Zündkerze 53  
 Zusatzheizung 138f.  
 Zusatzverbraucher 136  
 Zwangsbelüftung 139  
 Zweitnutzung 157  
 Zweit- oder Drittfahrzeuge 201  
 Zwischenspeicherung 114  
 Zyklen-Alterung 85  
 Zyklus 124  
 Zylinder 52