

# 1

## Einführung

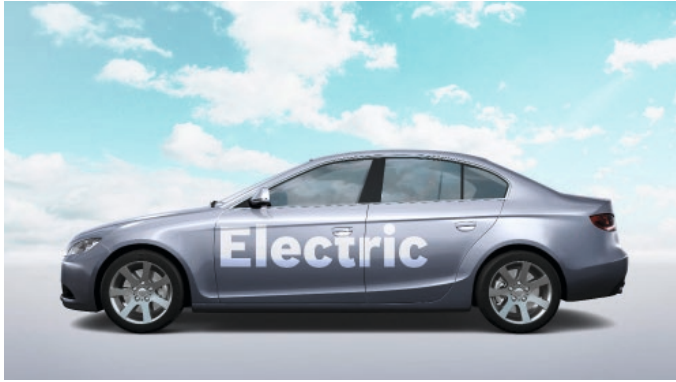
### Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

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 Dieselaautos 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.

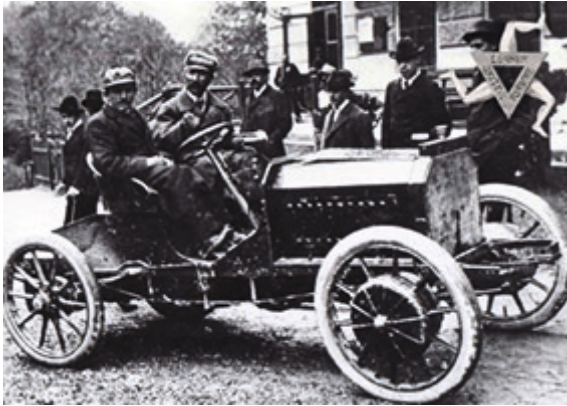
# 2

## 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

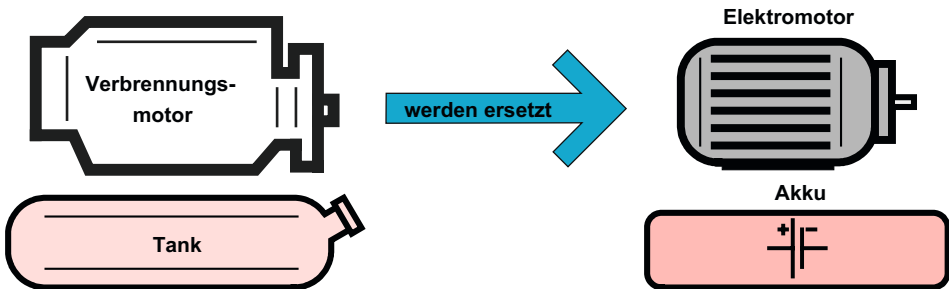
Wird dagegen eine vorhandene Plattform als Basis für die Entwicklung genutzt, spricht man von **Conversion-Design**. Diesen Weg gingen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier wurden beim *smart electric drive*, der B-Klasse (siehe Bild 2.5), dem *e-up* und dem *e-Golf* jeweils vorhandene Plattformen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

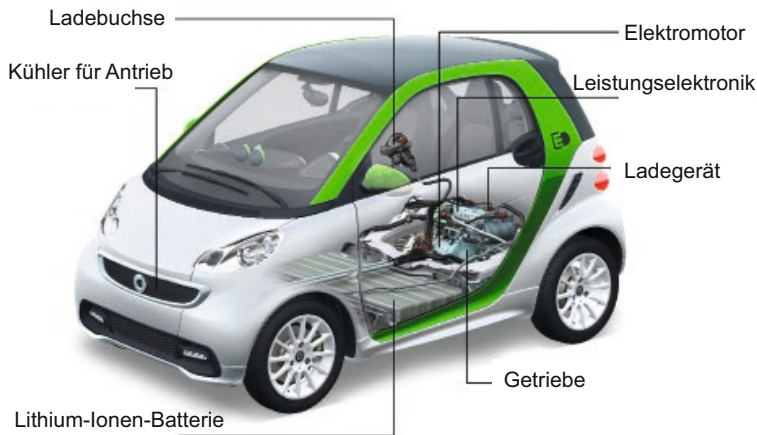
Langfristig allerdings, bei großen Stückzahlen, hat das Purpose-System Vorteile, bietet doch die Elektrifizierung eine Menge neuer Freiheitsgrade, die zur Optimierung des Gesamtfahrzeuges genutzt werden können. Seit 2020 setzt sich der Trend zu eigenen Plattformen für die Elektromobile bei nahezu allen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

# Index

## Symbole

- 5G Hochgeschwindigkeitsverbindungen 228
- 48 Volt Bordnetz-Technik 23

## A

- Abbremsen 134
- Abhol- und Abgabestation 219
- Abrechnungsmodalitäten 111
- Abrechnungssystem 111
- Abwärme 141
- AC-Laden 108
- AC-Schnellladung 111
- ADAC ECOTest 149
- Agora Verkehrswende 186
- Akku 71
  - Wechsel 33, 115
- aktiver Bremswiderstand 124
- Aktoren 224
- Alterung 79
- Ammoniak 90
- amorpher Kohlenstoff 73
- Amperestunden 99
- Angebot Elektrofahrzeuge 197, 230
- Anschaffungskosten 188
- Antriebsakkus 79
- Antriebsenergie 122
- Antriebskonzepte 123
- Antriebskraft 65, 68, 120, 126
- Antriebsmoment 69, 120
- Antriebsstrang 10
- Asynchronmotor 54, 58

- Auslassventil 44
- Automated Lane Keeping System (ALKS) 226
- Automatikgetriebe 12
- Automatisiertes/Autonomes Fahren 224

## B

- BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) 189
- Batterieelektrische Fahrzeuge 17
- Batteriegehäuse 76
- Batterieherstellung 179
- Batterie-Management-System 36, 80, 102
- Batteriewechsel 33
- battery electric vehicles 71
- Battery Pack 29
- Bestpunkt 46
- Bestpunkt-Drehzahl 49
- Betriebskosten 14, 189
- Betriebsszenarien 130
- bidirektionales Laden 117
- Bilanzierungsregeln 157
- Bioethanol-Betrieb 144
- Biogasanlagen 163
- Biomasse 163
- Bleiakku 6
- Blockheizkraftwerke 164
- Braunkohle 157
- Bremsen 124
- Bremsenergie 136
- Brennstoff 144

Brennstoffzelle 29 f., 53  
Brennstoffzellenfahrzeug 17, 29, 88, 174,  
210  
Brennstoffzellen-Hybridbus 32  
Bruttostromerzeugung 155

## C

car2go 216  
Carbon Footprint 176  
Carsharing im ländlichen Raum 219  
CATL 83  
CCCV-Ladeverfahren (Constant Current,  
Constant Voltage) 101  
CCS-Ladedose 109  
CCS-System 203  
CHAdeMO-System 103, 109  
Chamäleon Ladesystem 200  
Charge-Depleting-mode 148  
Charge Sustaining mode 148  
Citaro Fuel-Cell-Hybrid 31  
CO<sub>2</sub>  
– Ausstoß 15, 231  
– Bilanz 176, 179  
– Grenzwerte 16  
– Reduktion 15  
Coefficient of Performance 144  
Combined Charging System (CCS) 103,  
109  
Combo-2-Stecker 109  
Combo-System 106  
Conversion-Design 9  
Coulomb-Wirkungsgrad 99  
Crashtests 82  
cw-Wert 139

## D

Dauerleistung 61  
Dauermagneten 56  
DC-High-Ladung 106, 109  
DC-Low-Ladung 106  
Dieselmotor 42, 46  
Differenzial 65  
Differenzialgetriebe 18

Direkteinspritzer 45  
Drehbeschleunigung 120  
Drehmassen 122  
Drehmassenzuschlagsfaktor 125  
Drehstrom 60  
Drehstrommotor 56, 60  
Drehstromnetz 18  
Drehzahlbereich 62  
DriveNow 216  
Druckleitungen 170  
dynamisches Kräftegleichgewicht 121  
dynamisches Verhalten 239

## E

E-Bikes 34  
Eckdrehzahl 62  
Effizienz des Elektroantrieb 138  
e-gas 174  
Einsparpotenzial 138  
Einspritzzeitpunkt 45  
Eisen-Phosphat-Kathode 76  
Electric Traction Motor 29  
elektrifizierter Antriebsstrang 53  
elektrische Speicher 168  
Elektrobusse 32  
Elektrobusverkehr 221  
elektrochemische Speicher 168  
Elektrofahrräder 33  
Elektrofahrzeuge 1, 3  
Elektroflugzeuge 40  
Elektroinfrastruktur 103  
Elektro-Lkw 223  
Elektrolyse 88, 172  
Elektromagnet 56  
Elektromotor 53  
Elektromotorräder 40  
Elektro-Multikopter 40  
elektronische Motorregelung 224  
Elektro-Pkw 17  
Elektro-Scooter 40  
energetische Amortisationszeit 178  
Energiebilanz 47, 133  
Energie des Kraftstoffs 48  
Energiedichte 74, 76

Energieeffizienz 21, 97  
 Energieerhaltungssatz 65, 67  
 Energiegehalt 48, 138  
 Energiegehalt Wasserstoff 89  
 Energiespeicher 21, 71, 88, 117, 168  
 Energieverbrauch 4, 123, 129  
 Energiewandler 21  
 Energiewende 230  
 Entlade-Schlussspannung 102  
 Entsorgung 178  
 Erdgas (CNG)-Motoren 42  
 Erdgasfahrzeuge 173  
 Erdgasspeicher 171  
 Erhaltungsaufwendungen 189  
 erneuerbare Energien 154  
 Erneuerbare-Energien-Richtlinie 158  
 Erntefaktor 178  
 Erzeugungskosten 167  
 E-Taxis 220  
 EU Battery Alliance 214  
 EU-Ladestecker 108  
 EU-Strommix 184  
 Eutrophierung 177

## F

Fahrkomfort 18  
 Fahrmodus 36  
 Fahrprofil 151  
 Fahrstabilität 10  
 Fahrtenschreiber 226  
 Fahrwiderstand 120  
 Fahrwiderstandskurven 128  
 Fahrzeugbeschleunigung 70, 126  
 Fahrzeugbremse 132  
 Fahrzeugelektronik 96  
 Fahrzeugflotten 115  
 Fahrzeugheizung 14  
 Fahrzeugmasse 140  
 Fahrzeugplattform 203  
 Fahrzeugspule 114  
 Fahrzyklus 144  
 F-Cell-Modell 31  
 Feinstaubbelastung 180  
 FI-Schalter 110

Fixkosten 188  
 Flottenwert 182  
 Flugzeuge mit Brennstoffzellenantrieb 41  
 Flüssigspeichertank 92  
 Flüssigwasserstoff 90  
 Fördermaßnahmen 117  
 Fördermittel 213  
 fossile Energiequellen 154  
 Free-floating-Konzept 219  
 free floating system 218  
 Frequenz 60  
 Frontmotor 34  
 Fuel Cell Stack 29, 93  
 Fuel Cell Vehicle 17  
 Fuel Tank - hydrogen 29

## G

Garantiebedingungen 80  
 Gasinfrastruktur 172  
 Gaskraftwerke 172  
 Gasmotoren 172  
 Gasmotor-Generator-Kombination 164  
 Gasnetz 89  
 Gasspeichertank 92f.  
 Generator 19, 25  
 Generatorbetrieb 11  
 Geräuschemissionen 216  
 Gesamteffektivität der Brennstoffzellen-  
 antriebe 89  
 Gesamtreichweite 37  
 Gesamtwirkungsgrad 151  
 Getriebeabstimmungen 63  
 Getriebeübersetzung 66  
 Gewicht 139  
 Gleichstrom-Ladestationen 106  
 Gleichstrommotoren 54  
 Gleichstrom-Schnellladen 103, 203  
 Global Warming Potential 176  
 Graphen 84  
 Graphit 73  
 grüner Wasserstoff 88  
 Güterverkehr 33, 208, 221

**H**

H2-Netze 90  
Halbleitermaterial 97  
Haushaltssteckdose 107  
Heckmotor 34  
Heizleistung 141  
Heizung 141, 220  
Herstellungsphase 178  
Hochdruck-Wasserstofftank 210  
Höchstzahl 66  
Hochvoltbatterien 19  
Hybridantriebe 42  
Hybridfahrzeug 17, 21  
Hybridisierung 22, 231  
Hybridmotor 59  
Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle 29

**I**

Important Projects of Common European Interest (IPCEI) 214  
In-Cable Control-Box (ICCB) 104  
Induktion 58  
induktives Laden 114  
Infrastruktur 4, 102  
Innenwiderstand 73, 100  
innovatives Design 198  
integrierter Startergenerator (ISG) 23  
Inverter 19, 96  
ionischer Verdichter 93  
Isolation 143

**K**

Kamera 227  
Kapazität 98  
Kastenwagen 209  
Kaufprämie 212  
KERS 27  
Kfz-Antriebe 42  
kinetische Energie 133  
Klimaanlage 141  
Klimaschädlichkeit 181  
Klimatisierung 76, 143

Kollektor 56  
Kommunikationsmodul 105  
Kommutator 56  
Kompaktklasse 126, 138  
Komponententests 82  
Kompressionsarbeit 89  
konduktives Laden 114  
konventionelle Kraftwerke 167  
kostenloses Parken 212  
Kosten Plug-in Hybride 193  
Kostenvergleich 188  
Kräftegleichgewicht nach d'Alembert 129  
Kraftfahrt-Bundesamt 181, 195  
Kraftstoffeinsparungen 24  
Kraftstofftank 10  
Kraftstoffverbrauch 24  
Kraft-Wärmekopplung 164, 172  
Kraftwerkspark 154  
Kryopumpen 93  
Kryotank 90  
Kühlbedarf 143  
kumulierter Energieaufwand 178  
Kurbelwelle 43  
Kurbelwellen-Startergenerator 23

**L**

Ladearten 103  
Ladegeräte 19, 97  
Lade-Gleichspannung 97  
Ladeinfrastruktur 118, 212, 220  
Ladekabel 98, 102, 105  
Ladekontrolle 81  
Ladeleistung 107  
Lademodi 103  
Laderate 99  
Laderaumvolumen 209  
Ladesäulen 231  
Ladeschlussspannung 80, 101  
Ladespule 114  
Ladestationen 117  
Ladestrom 74  
Ladeszenarien 106  
Lade- und Entladekurve 100

Ladeverfahren 101  
 Ladeverluste 148  
 Ladevorgang 80  
 Ladezyklen 74, 83  
 Lärm 179  
 Lastanhebung 49  
 Lastmanagement 81  
 Lastspitzen 168  
 Laufwasserkraftwerke 165  
 Lautstärke 12  
 Lebensdauer 79, 190  
 Lebenszyklus 178  
 Leerlaufdrehzahl 62  
 Leichtbaumaterialien 198  
 Leistungselektronik 96  
 Leistungsverlauf 137  
 Leistungsverzweigter Hybrid 26  
 Leistungszahl 144  
 Level 3 226  
 LFP-Zellen 76  
 Lidar 228  
 Li-Luft-Akku 84  
 Lithium-Festkörper-Akkus 84  
 Lithium-Ionen-Akku 7, 42, 71  
 Lohner-Porsche 6  
 lokal emissionsfreie Fahrzeuge  
 181  
 Luftschadstoffe 179  
 Luftwiderstand 70, 122, 129  
 Luftwiderstandsbeiwert 139

## M

Magnetfeld 56, 58  
 Mautgebühren 212  
 maximales Drehmoment 62, 127  
 mechanische Antriebsenergie 11  
 mechanische Nutzarbeit 48  
 mechanischer Antriebsstrang 139  
 mechanische Speicher 168  
 Mehrwertsteuer 212  
 Memoryeffekt 72, 101  
 Methangas 163  
 Methanisierung 173  
 MGU-H 28

MGU-K 28  
 Mikrohybrid 23  
 Mildhybrid 23  
 Mischhybrid-Struktur 25  
 Mittelmotoren 36  
 Mobilitätskonzepte 216  
 Mode-4-Gleichstromladung 109  
 Model 3 203  
 Modellbildung 239  
 Modellrechnungen 5  
 Modul 75  
 Momentengleichgewicht 68  
 Motor  
 – Auslegung 64  
 – Drehmoment 47, 49  
 – Geräusch 179  
 – Leistung 51  
 – Reibung 132  
 multimodales Verkehrssystem 2  
 Muschel-Diagramm 46

## N

nachhaltige Mobilität 158, 232  
 Nachhaltigkeit 187  
 nachwachsende Rohstoffe 164  
 Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur  
 118  
 Nationaler Entwicklungsplan  
 Elektromobilität 1, 158, 216  
 Natrium-Nickelchlorid-Batterie 71  
 NEFZ 144  
 Netzstörungen 168  
 Neuer Europäischer Fahrzyklus 144  
 Neuwagenflotte 181  
 Neuzulassungen 212  
 New Energy Vehicles 213  
 Nickel-Metallhydrid-Akku 71  
 Niederspannungs-Bordnetz 96  
 Nippon Charge Service 113  
 Nockenwelle 44  
 Northvolt 83  
 Nullemissionsfahrzeuge 181  
 Nutzfahrzeuge 33, 208  
 Nutzungsdauer 188

Nutzungsphase 176  
Nutzungsverhalten 169

## O

Offshore-Anlagen 90, 163  
Ökobilanz 177, 183  
Ökosysteme 177  
Ölressourcen 158  
ÖPNV-Angebote 219  
Ottomotor 6, 42, 46

## P

Paketzustellung 222  
parallele Struktur 25  
Pedal Electric Cycle 34  
PEM-Brennstoffzelle 94  
permanentmagneterregte Synchronmotoren 57  
photoelektrischer Effekt 160  
Photovoltaik 160  
Photovoltaik-Anlagen 160  
Pkw-Kaufsteuer (BPM) 212  
Planetengeräte 67  
Plug-in-Hybrid 3, 17, 24, 230  
Polymer 73  
Pouch-Zellen 77  
Power-Swap-Staions 116  
Power-to-Gas 90, 172  
Power-to-Gas Projekte 174  
Primärenergiequellen 153  
Prinzip von d'Alembert 120  
prismatische Zellen 77  
Protonen-Austausch-Membran 93  
Proton Exchange Membrane Fuel Cell 93  
Proton Exchange Membrane, PEM 88, 93  
Prüfstelle 184  
Prüfzyklus 146  
PTC 143  
Pumpspeicherkraftwerke 165, 170  
Purpose-Design 8  
Purpose-System 9

## Q

Querschnittsfläche 139

## R

Radarsensoren 227  
Radnabenmotoren 6, 60  
Rahmenbedingungen 212  
Range Extender 20, 26  
Range-Extender-Motor 20  
Realfahrten 150  
Real-Reichweite 141  
Rechtliche Rahmenbedingungen 225  
Recycling 63, 178, 215  
Regelbarkeit 56  
Regelung Nr. 101 145  
regenerativ erzeugter Strom 4  
Reibung 70, 122  
Reibungsverluste 124  
Reichweite 4, 79  
Reichweitenverlängerung 20  
Reichweitenverminderung 143  
Reichweite von Elektrofahrzeugen 37  
Reifen-Fahrbahngeräusche 180  
Rekuperation 11, 19, 25, 54, 124, 131, 136  
Reluktanzmotor 59  
Restkapazität 134  
Restwert 191  
Ridesharing 218  
riemengetriebener Startergenerator (RSG) 23  
Rollreibung 128  
Rotation 65, 119  
Rotor 55  
Rückgewinnung von Energie 125  
Rundzellen 76

## S

SAE-Levels 225  
Schadstoffbelastung 180  
Schadstoffe 11  
Schaltgetriebe 12  
Schaltkupplung 12



- Schleifkontakte 58
  - schnelle Pedelecs 34
  - Schnellademöglichkeit 231
  - Schrittweite 70
  - Schubbetrieb 124
  - Schutzschaltung 101
  - schwarzstartfähig 170
  - Second Life 169, 187
  - Second-Use-Phase 179
  - Segeln 23
  - Segway 38
  - Selbstentladung 73
  - Selbstzündung 45
  - Sensoren für das Automatisierte Fahren 227
  - serielle Struktur 25
  - Service-Aufwand 13
  - Service-Kosten 13
  - ShareNow 216
  - Sicherheit 80, 82
  - Sicherheitsüberwachung 81
  - Silizium 73, 84
  - Siliziumkarbid 97
  - Simulation 122, 137, 239, 242
  - SLAM 112
  - smart grid 169
  - SoC 106
  - Solarstrom 161
  - Solarzellen 143
  - Solid-State-Akkus 84
  - Sommersmogpotenzial 177
  - Speicherseen 166
  - Speichertank 30
  - Speicherung 89
  - spezifischer Kraftstoffverbrauch 46
  - staatliche Förderung 211
  - Stadtfahrzeug 201
  - Startdrehzahlen 62
  - Starterbatterie 23
  - Startergenerator 23
  - Start-Stopp-Automatik 23
  - State of Charge (SoC) 81
  - stationsunabhängiges Carsharing 217
  - Stator 55
  - Staustufen 165
  - Steckverbindung 108
  - Steckvorrichtung 105
  - Steigungswiderstand 70, 129
  - Steuer 190
  - Steuererleichterungen 212
  - Steuerungselektronik 13
  - Stirnradgetriebe 67
  - Stopzeiten 146
  - Strafzahlungen 182
  - Strahlungswärmeeintrag 143
  - Stromangebot 231
  - Strombedarf 167
  - stromerregte Synchronmotoren 58
  - Stromerzeugung 11, 167
  - Strommarkt 167
  - Strommix Deutschland 154
  - Stromspeicher 169
  - Stromüberschuss 167
  - Stromversorger 167
  - Subventionsprogramm 212
  - Supercharger 111
  - Supercredits 182
  - Synchronmaschine 57
  - Synchronmotor 54, 57, 59
  - synthetisches Gas 173
  - Systemkosten 84
  - Systemleistung 193
- T**
- Tank-to-Wheel 11
  - Tank-to-Wheel-Betrachtung 153
  - Tankvorgang 210
  - terrestrische Solarkonstante 161
  - thermische Massen 143
  - Tiefentladen 74
  - Tiefentladungspunkt 80
  - Toleranzausgleich 76
  - Total Cost of Ownership 188
  - Trägheitskraft 70
  - Transport 89
  - Treibhaus-Effekt 143
  - Treibhausgase 176
  - Treibhauspotenzial 176
  - Tretlagermotor 36

Turbinen 165  
Typ-2-Stecker 108  
Typen für Steckverbindungen 108

## U

Überlastschutz 110  
Überschussstrom 172  
Ultraschallsensor 227  
UMBRela 178  
Umfangsgeschwindigkeit des Rades 67  
Umrichter 19  
umrichter gespeister Drehstrommotor 18  
Umweltbelastung 153  
Umweltbilanz 176  
Umweltmanagement 177  
Untersetzungsgetriebe 12, 18  
Untertagespeicher 171  
utility factor (UF) 148

## V

Vehicle to Grid 116  
Verbrauch  
– Berechnungen 157  
– Kennfeld 46, 49  
– Simulationen 126  
– Wert 138  
Verbreitung von Elektrofahrzeugen 188, 194  
Verbrennungsgase 44  
Verbrennungsmotor 3, 6, 42  
Verdichtung 45  
Vereinte Nationen 146  
Verflüssigung 89  
Vergleichsfahrzeug 183  
Verluste 133  
Verschleißreparaturen 189  
Verwertungsphase 176, 178  
Verzögerungsphasen 146  
Viertaktmotor 43  
Viertakt-Zyklen 44  
Vollhybrid 24  
Vorkette 156

Vorkonditionierung 143  
Vor-Ort-Betrachtung 181

## W

Wallbox 104  
Wärmepumpe 143  
Wärmetauscher 143  
Wärmeverluste 100  
Warngeräusche 12  
Wartungs- und Werkstattkosten 190  
Wasserkraft 165  
Wasserkraftwerke 166  
Wasserstoff 29, 172  
Wasserstoffflugzeug 40  
Wasserstoffgewinnung 88  
Wattstunden 99  
Wechselakku 20, 115 f.  
Wechselrichter 19, 160  
Wegfahrsperrung 110  
Weiterentwicklung Akkus 83  
Well-to-Wheel 11  
Well-to-wheel-Wirkungsgrad 95  
Werkstattkosten 192  
Wertverlust 190  
Widerstandskurven 128  
Wiederverwendung 178  
Wiener Übereinkommen 225  
Windanlagen an Land 163  
Windenergieanlagen 162  
Wirkungsabschätzungen 177  
Wirkungsgrad 49, 138  
Wirtschaftlichkeit 5  
Wirtschaftskommission für Europa 145  
WLTC, Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle 146  
WLTP 146  
WLTP-Verbrauch 148  
Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) 146

## Z

Zellenherstellung 82  
Zentralmotoren 60

Zero Emission Vehicle 11  
Zugangsberechtigung 111  
Zulassungszahlen 182, 212  
Zusatzheizung 143  
Zusatzverbraucher 141  
Zwangsbelüftung 143

Zweitnutzung 170  
Zweit- oder Drittfahrzeuge 219  
Zwischenspeicherung 124  
Zyklen-Alterung 79  
Zyklus 144  
Zylinder 43