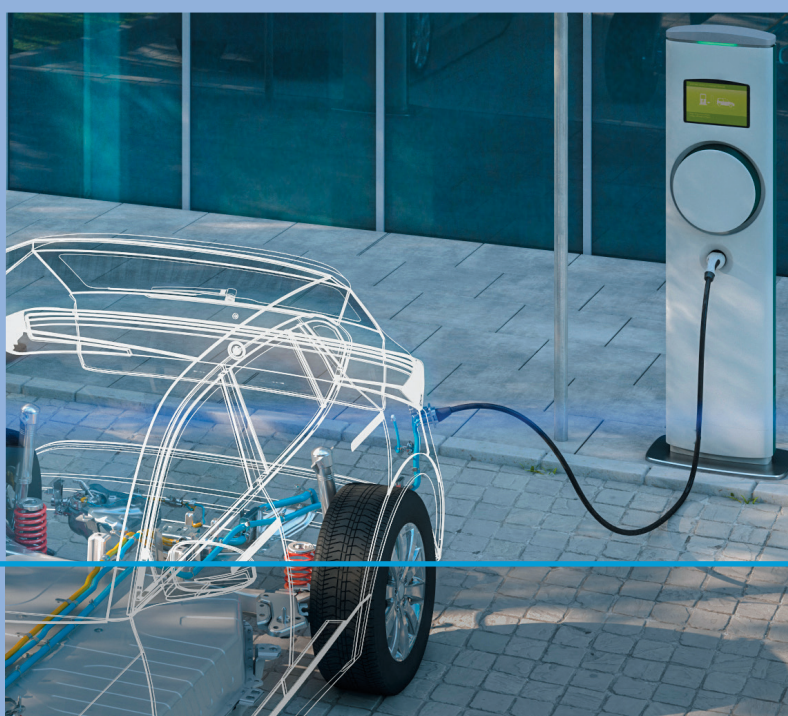


Anton Karle



Elektromobilität

Grundlagen und Praxis



6., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Anton Karle

Elektromobilität

Grundlagen und Praxis

6., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Anton Karle

Hochschule Furtwangen



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © shutterstock.com/Herr Loeffler

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47508-3

E-Book-ISBN 978-3-446-47509-0

Inhalt

1	Einführung	1
2	Überblick Elektrofahrzeuge	6
2.1	Geschichte und grundsätzliche Bedeutung	6
2.2	Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug	8
2.3	Die Vorteile des Elektroantriebs	11
2.4	Die Nachteile des Elektroantriebs	14
2.5	Vorgaben zur CO ₂ -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	15
3	Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis	17
3.1	Elektro-Pkw	17
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge	17
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV)	20
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV)	21
3.1.3.1	Mikrohybrid	23
3.1.3.2	Mildhybrid	23
3.1.3.3	Vollhybrid	24
3.1.3.4	Plug-in-Hybride	24
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride	25
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1	27
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug	29
3.1.3.8	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge	30
3.2	Elektrobusse	32

3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge	33
3.4	Elektrofahrräder	33
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern	34
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern	37
3.5	Weitere Elektrofahrzeuge	38
3.5.1	Segway	38
3.5.2	Elektromotorräder	40
3.5.3	Elektroflugzeuge	40
4	Grundlagen Kfz-Antriebe	42
4.1	Übersicht Antriebe	42
4.2	Verbrennungsmotor	43
4.2.1	Funktion Viertaktmotor	43
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungsmotors	45
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch	47
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen	49
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld	51
5	Elektrifizierter Antriebsstrang	53
5.1	Elektromotor	53
5.1.1	Anforderungen	54
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren	54
5.1.3	Gleichstrommotor	54
5.1.4	Drehstrommotor	56
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektrokraftfahrzeugen	60
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe	61
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb	63
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs	65
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl	66

5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung ...	66
5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors	67
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft	69
5.2	Energiespeicher Akku	71
5.2.1	Grundlagen und Begriffe	71
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku	72
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakku	75
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektrofahrzeugen	78
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus	79
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS)	80
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus	82
5.2.4	Hersteller	82
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Li-Ionen-Akkus	83
5.2.6	Neuentwicklung Na-Ionen-Akkus	85
5.2.7	Welche Akkuzellen eignen sich für welche Fahrzeuge?	86
5.3	Energiespeicher Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge	88
5.4	Leistungselektronik, Inverter	96
6	Laden und Ladeinfrastruktur	98
6.1	Grundlagen Akkuladen	98
6.1.1	Die Laderate	99
6.1.2	Kapazität des Akkus	99
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah)	99
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad ...	99
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen	100
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus	102
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen	102
6.2.1	Ladearten und Lademodi	103
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer	107
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen	108
6.2.4	Sicherheit beim Laden	110

6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur	110
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten	114
6.4.1	Induktives Laden	114
6.4.2	Wechselakku	115
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid	116
6.4.4	Dichte von Ladestationen	117
7	Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen	119
7.1	Physikalische Grundlagen	119
7.1.1	Berechnungsgrößen	119
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung	120
7.1.3	Energie und Verbrauch	122
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände	124
7.2	Verbrauchssimulationen	126
7.2.1	Einflussgrößen	126
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	127
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch	128
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch	131
7.2.5	Verbrauchssimulation anhand eines Testzyklus	135
7.2.6	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktionsparameter	139
7.2.7	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite	141
7.2.7.1	Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen	141
7.2.7.2	Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung	143
7.3	Verbrauchs- und Reichweitenangaben von Elektrofahrzeugen gemäß NEFZ	144
7.4	Verbrauch und Reichweite gemäß WLTP	146
7.5	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen	151
8	Strom für die Elektrofahrzeuge	153
8.1	Energieerzeugung	153
8.1.1	Primärenergiequellen	154

8.1.2	Der Strommix Deutschland	154
8.1.3	Erneuerbare Energien	158
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen	160
8.1.3.2	Windenergie	162
8.1.3.3	Strom aus Biomasse	163
8.1.3.4	Wasserkraft	165
8.2	Speicherung von Strom	167
8.2.1	Speichertechnologien	168
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher	169
8.2.2.1	Akkumulatoren	169
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke	170
8.2.2.3	Erdgasspeicher	171
8.2.2.4	Power-to-Gas	172
9	Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	176
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz	176
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge	178
9.3	Nutzungsphase	179
9.3.1	Lärm	179
9.3.2	Luftschadstoffe	180
9.3.3	CO ₂ -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	181
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen ..	183
10	Markt	188
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	188
10.1.1	Anzusetzende Kosten	188
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor- Fahrzeug	190
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	194
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	194
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge, Anfangsmodelle und Entwicklung	197
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	197

10.2.2.2 Plug-in-Hybride	206
10.2.2.3 Nutzfahrzeuge	208
10.2.2.4 Brennstoffzellenfahrzeuge	210
10.3 Wirkung staatlicher Förderung	211
10.4 Förderung der Elektromobilität in Deutschland	213
10.5 Schlussfolgerungen Markt	215
11 Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	216
11.1 Carsharing	216
11.1.1 Carsharing im städtischen Umfeld	217
11.1.2 Carsharing im ländlichen Raum	219
11.2 E-Taxis	220
11.3 Elektrobusse	220
11.4 Güterverkehr	221
11.4.1 Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	222
11.4.2 Elektro-Lkw	223
12 Automatisiertes/Autonomes Fahren	224
13 Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	230
14 Berechnungen	233
14.1 Aufgaben	233
14.2 Workshop Simulation	239
Glossar	244
Ergänzende Informationsquellen	248
Index	250

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 zukunftsfähig 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 verbunden ist, der sogenannten Energiewende. Denn erst wenn man die Gesamtenergiebilanz, 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 entsprechenden Fördermaßnahmen. Viel einflussreicher wirken sich entsprechende gesetzliche Vorgaben und Verordnungen aus. Hier wären zu nennen die Bestimmungen zum Flottenverbrauch und dem dazugehörenden zulässigen CO₂-Ausstoß der Fahrzeugflotten der Hersteller. Fachleute sagen, dass die dort festgelegten Grenzwerte ohne eine verbreitete Elektrifizierung des Antriebsstrangs wohl nicht erreicht werden können. Solche Vorgaben werden nicht mehr nur national bestimmt, sondern von der EU europaweit festgelegt. Vergleichbare 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 6. Auflage

Die positive Entwicklung der Elektromobilität hat sich auch zu Beginn des Jahres 2022 fortgesetzt. Allerdings führt die stark gewachsene Nachfrage nach Elektroautos zu zunehmend langen Lieferzeiten. Hinzu kommt, dass durch Probleme in den Lieferketten und den sogenannten Chipmangel die Produktion empfindlich verzögert wird. Dies führt dazu, dass die Zuwächse der Zulassungszahlen im Jahr 2022 nicht das Wachstum zeigen, wie es ursprünglich zu erwarten war. Auch zunehmende Probleme bei der Energieversorgung und stark gestiegene Energiepreise führen zu erheblichen Unsicherheiten im Marktgeschehen.

Daneben rücken steigende Rohstoffpreise und die immer kritischer werdende Verfügbarkeit von Materialien, insbesondere für die Herstellung der Fahrzeugbatterie, in den Fokus. Mit der Konsequenz, dass die Hersteller auch auf Alternativen bei der Zellchemie setzen, die mit weniger problematischen Rohstoffen auskommen. So werden vermehrt Lithium Eisenphosphat-Akkus (LFP-Zellen) eingesetzt. Die haben zwar eine geringere Energiedichte als die bisher vorrangig verwendeten NMC-Zellen, kommen aber ohne die kritischen Stoffe Kobalt oder Nickel aus. Und, ein weiterer Vorteil, sie sind deutlich kostengünstiger.

Auch hinsichtlich des Rohstoffes Lithium bahnt sich eine gangbare Alternative durch die Verwendung von Natrium-Ionen-Akkus an, die wohl bereits 2023 auf den Markt kommen können. Zwar haben diese Zellen eine nochmals geringere Energiedichte, bieten aber hinsichtlich Kosten und Verwendung bei tiefen Temperaturen deutliche Vorteile. Für eine Anwendung für Fahrzeugtypen, bei denen es nicht auf die ganz große Reichweite ankommt, kann das eine wirtschaftliche Alternative sein.

Kritisch gesehen wird inzwischen auch die Abhängigkeit bei den Akkuzellen für die Fahrzeugbatterie, die derzeit praktisch allein aus China, Südkorea und Japan geliefert werden.

Hier zeichnen sich Lösungen ab, da in den nächsten Jahren auch in Europa sogenannte Giga-Fabriken zur Zellherstellung gebaut werden. Diese werden nicht nur von den etablierten Herstellern aus Asien erstellt. Auch Zellfabriken europäischer Hersteller wie Northvolt entstehen. Und Fahrzeughersteller, beispielsweise VW und Stellantis, treiben eine eigene Zellentwicklung und Zellproduktion voran. So können einseitige Abhängigkeiten deutlich reduziert und die Batterieproduktion breiter, lokaler und somit auch sicherer aufgestellt werden.

Furtwangen, Juni 2022

Anton Karle

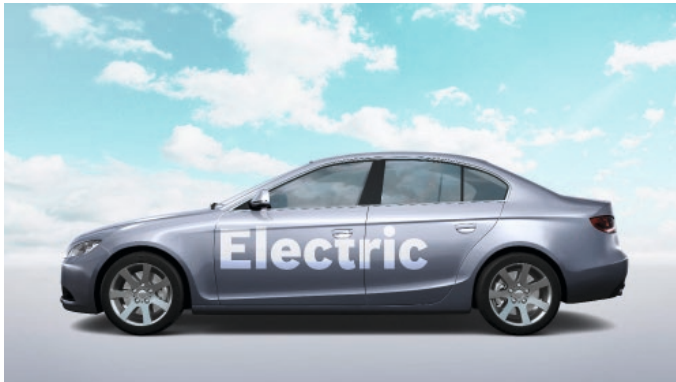
Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

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 CO₂-Emissionen der Verbrennermotoren zunehmend kritisch betrachtet und durch stetig strenger werdende Grenzwerte deutlich beschränkt. Die dadurch erforderlichen Anstrengun-

gen zur Reduzierung des CO₂-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.

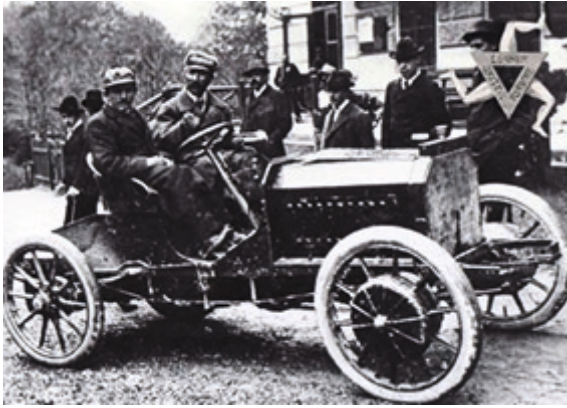
2

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 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 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.

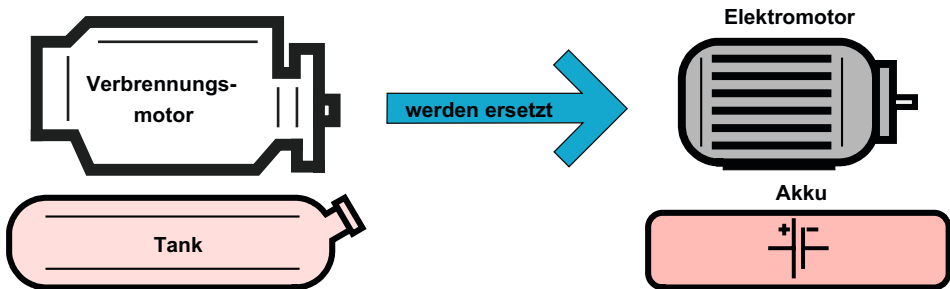


Bild 2.6 Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt

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

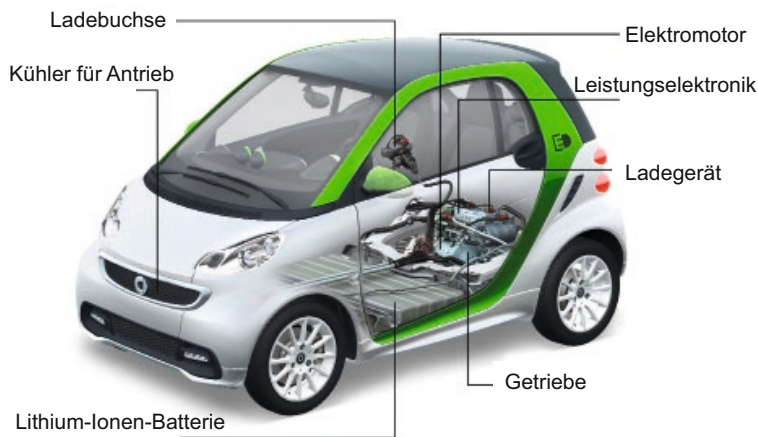


Bild 2.7 smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku. Quelle: Daimler AG

■ 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, sodass 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 CO₂-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.