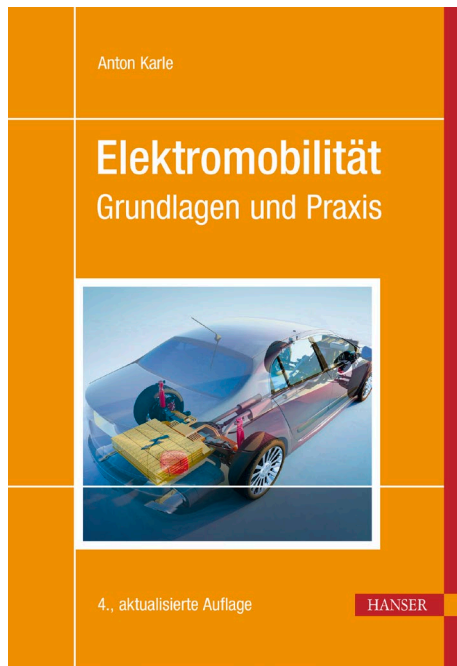


HANSER



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 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. 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 verbesserter 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 schwedische Batteriehersteller NORTHVOLT voran.

Der Druck nach noch mehr Elektrifizierung steigt gleichzeitig weiter. Werden doch die CO₂-Grenzwerte für Pkw ab 2030 nochmals um 37,5% verschärft.

Mittlerweile rückt auch der Schwerlastverkehr in den Fokus. Für Lkw und Busse wird es CO₂-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!

Inhalt

1	Einführung	15
2	Überblick Elektrofahrzeuge	19
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 ₂ -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	27
3	Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis	28
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-Hybride	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
4	Grundlagen Kfz-Antriebe	51
4.1	Übersicht Antriebe	51
4.2	Verbrennungsmotor	51
4.2.1	Funktion Viertaktmotor	52
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungs- motors	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 Verbrauchs- kennfeld	59
5	Elektrifizierter Antriebsstrang	60
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 Elektro kraftfahrzeugen	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 Fahrzeugakku	81
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektro- fahrzeugen	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

6 Laden und Ladeinfrastruktur 91

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	Wechselakku	106
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid	107
6.4.4	Dichte von Ladestationen	108

7 Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen 109

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 Konstruktions- parameter	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
8	Strom für die Elektrofahrzeuge	142
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
9	Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	164
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 ₂ -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	168
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen	170
10	Markt	174
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
11	Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	198
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
12	Förderung der Elektromobilität in Deutschland	206
12.1	Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte	206
12.2	Schaufenster für Elektromobilität	208
12.3	NPE-Fortschrittsberichte 2014 und 2018	208
13	Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	211
14	Berechnungen	213
14.1	Aufgaben	213
14.2	Workshop Simulation	219
	Glossar	224
	Verzeichnis Bildquellen	227
	Literatur	229
	Index	233

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. 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.

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 sogenannten 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 CO₂-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 Dieselaautos 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.

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.

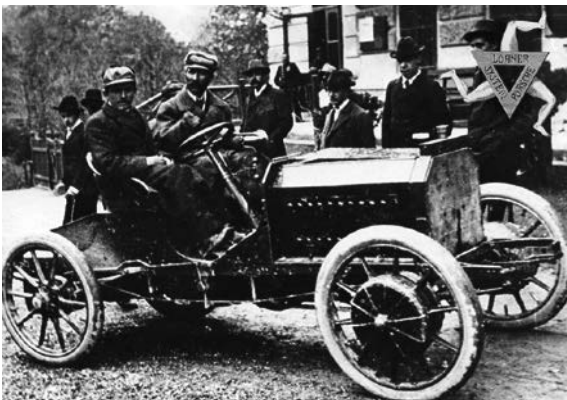


Bild 2.1 Ferdinand Porsche (Fahrer) und Ludwig Lohner (Beifahrer) im Lohner-Porsche.
Quelle: Archiv Familie Lohner

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 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 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 Fahrzeugboden anordnet und so für einen tieferen Schwerpunkt und damit mehr Fahrstabilität sorgt, wie in Bild 2.6 dargestellt.

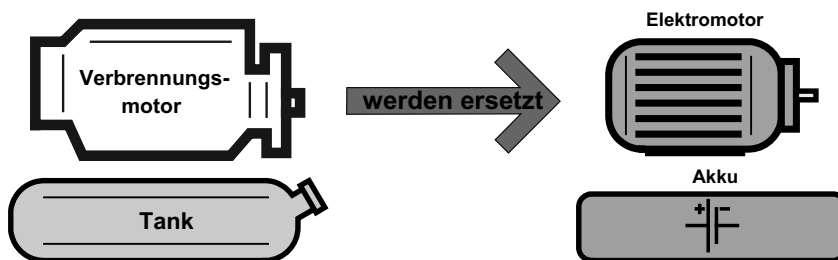


Bild 2.6 Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt.

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

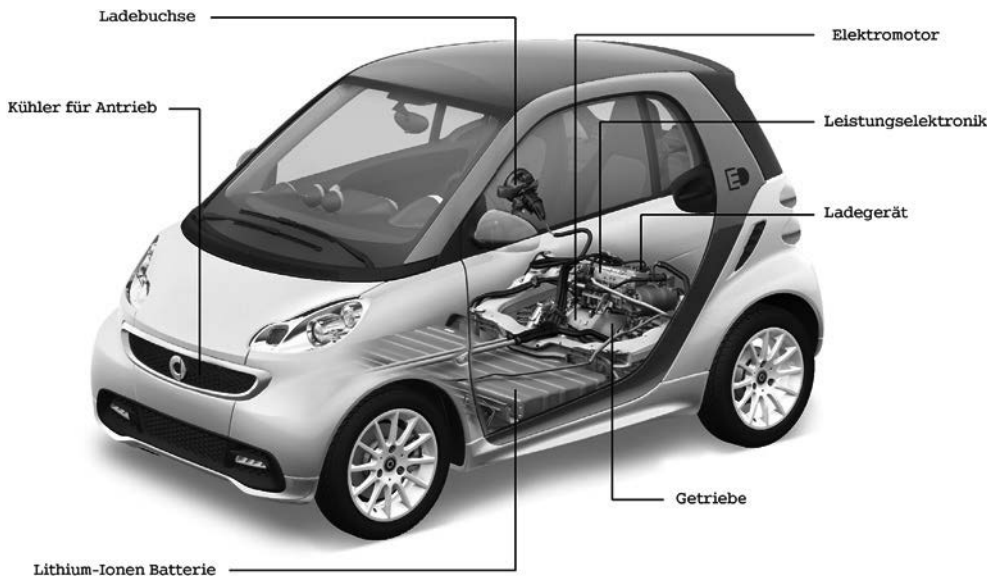


Bild 2.7 smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku.
Quelle: Daimler AG

■ 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 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).

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

Durch diese Eigenschaften werden ein herkömmliches Schaltgetriebe und eine Schalkupplung 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 einfachere Aufbau eine verbesserte Recyclingmöglichkeit des Fahrzeuges am Ende seiner Lebensdauer.



Elektrofahrzeuge bieten einen hohen Fahrkomfort und haben günstige Betriebskosten. Sie sind vor Ort emissionsfrei und CO₂-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

B

Ballungsräume 139
Batterieelektrische Fahrzeuge 28

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.
Bleiakku 19
Blockheizkraftwerke 152
Braunkohle 146
Bremsen 114
Bremsenergie 39, 128
Brennstoff 139
Brennstoffzelle 39
Brennstoffzellenfahrzeug 38, 163, 194
Brennstoffzellen-Hybridbus 42
Bruttostromerzeugung 143

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
 CO₂
 – 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

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

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

F

Fahrkomfort 29
 Fahrmodus 46
 Fahrprofil 141
 Fahrstabilität 22
 Fahrwiderstand 110
 Fahrwiderstandskurven 118
 Fahrzeugakku 78
 Fahrzeugbeschleunigung 77, 115
 Fahrzeugbremse 121
 Fahrzeuelektronik 89
 Fahrzeugflotten 106
 Fahrzeugheizung 26
 Fahrzeugklassen 124
 Fahrzeugmasse 132
 Fahrzeugplattform 188
 Fahrzeugspule 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 159f.
 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-Schnellladen 96, 188
 Global Warming Potential 164
 Graphen 89
 Graphit 79
 Güterverkehr 42, 192, 203

H

Halbleitermaterial 90
 Haushaltssteckdose 99
 Heckmotor 45
 Heizleistung 137f.
 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 52f.
 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 206f.
 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
 Nutzungsphase 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
 permanentmagnetenerregte 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
 Stoppzeiten 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 54 f., 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 174 f.
 Wasserkraft 153
 Wasserkraftwerke 154
 Wasserstoff 38 f., 160
 Wasserstoffgewinnung 40
 Wasserstofftankstellen 40
 Wattstunden 92
 Wechselakku 30, 106
 Wechselrichter 29, 148
 Wegfahrsperr 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 138 f.
 Zusatzverbraucher 136
 Zwangsbelüftung 139
 Zweitnutzung 157
 Zweit- oder Drittfahrzeuge 201
 Zwischenspeicherung 114
 Zyklen-Alterung 85
 Zyklus 124
 Zylinder 52