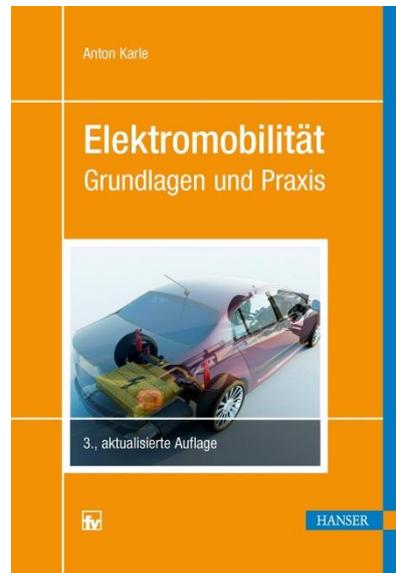


HANSER



Leseprobe

zu

Elektromobilität Grundlagen und Praxis

3., aktualisierte Auflage

Mit 142 Bildern und 21 Tabellen

von Anton Karle

ISBN (Buch): 978-3-446-45657-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-45668-6

ISBN (E-Pub): 978-3-446-45810-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45657-0>

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 dazugehörigen 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 3. Auflage

Das Jahr 2017 war im Bereich der Elektromobilität geprägt von einem deutlichen Wachstum der Zulassungszahlen bei den reinen Elektrofahrzeugen und den Plug-In-Hybriden, mit der Folge, dass deren Bestandszahl zusammengefasst auf etwa 100.000 in Deutschland angewachsen ist. Mehr aber noch war das Jahr geprägt von den Ankündigungen einer großen Anzahl neuer Elektrofahrzeug-Modelle bei fast allen Herstellern.

Auch hat dieses Jahr deutlich gemacht, dass der wesentliche Treiber für die Elektromobilität der nächsten Jahre China sein wird. Das Land hat inzwischen die weltweit größte Anzahl zugelassener Neufahrzeuge im Bereich der Elektromobilität. Gleichzeitig entfaltet die von China vorgegebene Elektroauto-Quote ab 2019 internationale Wirkung – besonders auch für deutsche Hersteller, ist China doch einer der bedeutendsten Absatzmärkte für deutsche Fahrzeuge (wenn nicht der bedeutendste).

Ein weiteres wichtiges Thema betrifft die Wertschöpfung bei der Fahrzeugherstellung. Etwa 40% der Wertschöpfung eines Elektroautos macht die Batterie aus. Und davon entfalten 60% auf die Zellherstellung. Daher mehren sich die Stimmen, dass auch deutsche Her-

steller in die Zellproduktion von Akkus der nächsten Generation einsteigen sollten. Allerdings legte beispielsweise VW Ende 2017 solche Pläne auf Eis, und auch der Zulieferer Bosch teilte im März 2018 mit, das Vorhaben einer eigenen Zellfertigung aufzugeben.

Neben diesen aufgezeigten Entwicklungen wird auch deutlich, dass neben der Elektromobilität die Vernetzung von Fahrzeugen und das autonome Fahren schon in nächster Zukunft das Kerngeschäft der Fahrzeughersteller und deren Zulieferer entscheidend beeinflussen werden.

Furtwangen, April 2018

Anton Karle

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	166
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 der Mercedes-Benz-B-Klasse Electric Drive	170
10	Markt	172
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	172
10.1.1	Anzusetzende Kosten	172
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor-Fahrzeug	173
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	176
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	176
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge	179
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	180
10.2.2.2	Plug-In-Hybride	188

10.2.2.3	Nutzfahrzeuge	190
10.2.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	192
10.3	Staatliche Förderung	193
10.4	Schlussfolgerungen Markt	195
11	Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	196
11.1	Carsharing	196
11.1.1	car2go	196
11.1.2	DriveNow	198
11.1.3	Carsharing im ländlichen Raum	199
11.2	E-Taxis	199
11.3	Elektrobusse	200
11.4	Güterverkehr	201
11.4.1	Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	201
11.4.2	Elektro-Lkw	203
12	Förderung der Elektromobilität in Deutschland	204
12.1	Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte	204
12.2	Schaufenster für Elektromobilität	206
12.3	NPE-Fortschrittsbericht 2014	206
13	Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	208
14	Workshop Simulation	210
■	Glossar	215
■	Verzeichnis Bildquellen	219
■	Literatur	221
■	Index	225

2

Überblick Elektrofahrzeuge

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

■ 2.1 Geschichte und grundsätzliche Bedeutung

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



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

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

In den vergangenen Jahren wurden nun solche Akkus zu größeren Paketen zusammengepackt, so dass sie sowohl von der elektrischen Leistung als auch von der Kapazität für 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 gehen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier werden 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 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.

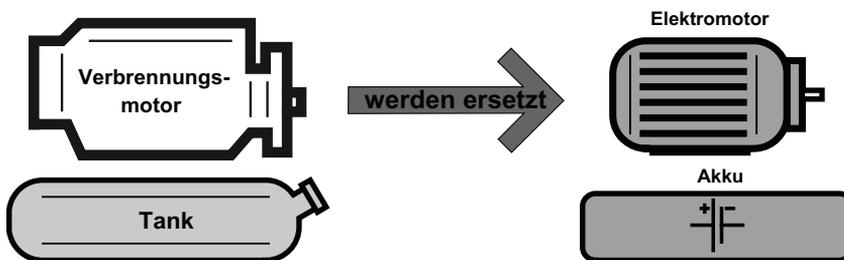


Bild 2.6 Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt.

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

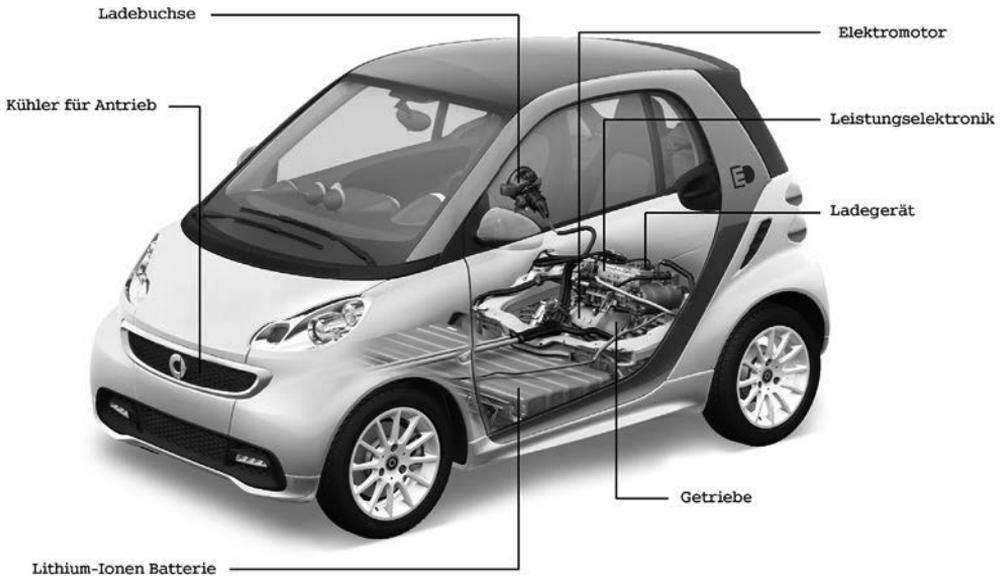


Bild 2.7 smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku.
Quelle: Daimler AG

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

Elektroantriebe sind leise

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

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

und Radfahrern wahrgenommen werden, so dass kritische Situationen entstehen können. Hier wird an Lösungen gearbeitet, bei denen beispielsweise elektronisch generierte Warngeräusche eingesetzt werden.

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.

■ 2.4 Die Nachteile des Elektroantriebs

Elektrofahrzeuge haben einen hohen Anschaffungspreis

Während sich für die wesentlichen Antriebskomponenten, den Elektromotor einschließlich der Leistungselektronik vergleichbare Kosten ergeben wie beim Verbrennungsmotor und dessen Steuerungselektronik, muss für die notwendigen Li-Ionen-Akkus ein erheblicher Mehrpreis in Kauf genommen werden. Für die heute in Elektroautos üblichen Akkus mit einer Kapazität von etwa 20 kWh ist mit einem höheren Anschaffungspreis von mehr als 10.000 Euro zu rechnen (Stand 2014). Zukünftig ist zu erwarten, dass die Stromspeicher kostengünstiger werden, und sich die Kosten bis zum Jahr 2020 halbieren könnten.

Allerdings dürfen für eine Kostenbetrachtung nicht allein die Anschaffungskosten herangezogen werden. Für Elektrofahrzeuge gibt es auch Kostenvorteile, besonders durch deutlich geringere Betriebskosten infolge des geringen Energieverbrauchs. Im Abschnitt 10.1 „Kostenvergleich“ wird eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

Elektrofahrzeuge haben eine eingeschränkte Reichweite und eine lange Ladedauer

Bei den heute üblichen und noch bezahlbaren Akkukapazitäten weisen die Elektroautos nominelle (d. h. unter den „Labor-Bedingungen“ gemäß den Vorschriften der Europäischen Union) ermittelte Reichweiten von 150 bis 200 km auf. In der Praxis verringern sich diese Reichweiten teilweise deutlich. So kann der Betrieb einer Klimaanlage oder der Fahrzeugheizung zu Reichweitenverlusten um ein Drittel führen. In der Regel reichen solche Reichweiten für die meisten Tagesfahrten aus. Im Standardfall wird dann über Nacht nachgeladen. Dies kann grundsätzlich an jeder Haushalts- bzw. Garagensteckdose erfolgen, allerdings mit Ladedauern von mehreren Stunden.

Muss aber bei längeren Fahrten während der Fahrt nachgeladen werden, sind diese langen Ladedauern untragbar. Deshalb wird dann an öffentlichen Ladesäulen mit hohen Ladeleistungen und verkürzten Ladezeiten geladen. Solche Ladesäulen entstehen derzeit an vielen Stellen. Zunehmend bieten sie die Möglichkeit einer Gleichstrom-Schnellladung mit sehr hohen Leistungen an. Das reduziert die Ladedauer auf etwa 30 Minuten.

Für Autofahrer, denen das zu unsicher ist, und die trotzdem elektrisch fahren möchten, bieten die Hersteller Hybridfahrzeuge an, seit 2014 vermehrt Plug-In-Hybride. Bei vielen Auslegungen können damit die meisten Fahrten (bis 50 km) rein elektrisch durchgeführt werden. Bei längeren Fahrten kommt der Verbrennungsmotor zum Einsatz.



Elektrofahrzeuge sind wegen der derzeit hohen Akkukosten teuer. Die Reichweite ist eingeschränkt, reicht aber für die meisten Tagesfahrten aus. Das Nachladen dauert lang, selbst mit Schnellladung mindestens eine halbe Stunde.

■ 2.5 Vorgaben zur CO₂-Reduktion als Treiber für die Elektromobilität

Kohlendioxid (CO₂) ist ein sogenanntes Treibhausgas. Das in die Atmosphäre eingebrachte Gas trägt zur schädlichen Klimaerwärmung bei. Da die Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liefern, hat die Europäische Union Maßnahmen ergriffen, um diese Emissionen in Zukunft zu verringern.



Im Dezember 2008 haben sich Rat und Parlament auf eine Verordnung zur Minderung der CO₂-Emissionen bei neuen Pkw geeinigt; am 23. April 2009 wurde die Verordnung auch formell verabschiedet. Die Verordnung schafft einen verbindlichen Rechtsrahmen (EU).

Diese Verordnung, die 2013 fortgeschrieben wurde, bedeutet für die Fahrzeughersteller, dass der Grenzwert für den CO₂-Ausstoß von 95 g CO₂/km als Flottenzielwert für alle verkauften Neuwagen ab 2020 verbindlich festgelegt wird. Der CO₂-Ausstoß hängt chemisch mit dem Kraftstoffverbrauch zusammen. 95 g CO₂ auf 100 km entsprechen etwa einem Benzinverbrauch von 4,1 l/100 km (Diesel: 3,6 l/100 km)!

Mit herkömmlichen Mitteln ist eine solche Reduktion nach Ansicht von Fachleuten nicht zu erreichen. Helfen können da die verkauften Elektrofahrzeuge. Die EU hat nämlich festgelegt, dass reine E-Autos mit 0 g CO₂ in die Berechnung des Flottenwerts eingehen. Auch Plug-In-Hybride haben diesbezüglich deutliche Vorteile, da auch bei ihnen, abhängig von der elektrischen Reichweite, die CO₂-Emission deutlich vermindert wird.

Das bedeutet, je höher der Absatz eines Automobilherstellers an reinen Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybriden ist, desto leichter werden die vorgegebenen CO₂-Grenzwerte erreicht. Die EU-Grenzwerte sind dabei weltweit die strengsten. In Japan ist der Grenzwert bei 105, in China bei 117 und in den USA 121 g CO₂ pro km.

Index

A

Abbremsen 123
Abhol- und Abgabestation 199
Abrechnungsmodalitäten 103
Abrechnungssystem 102
Abwärme 137
AC-Laden 100
AC-Schnellladung 102
ADAC-Autobahnzyklus 140
ADAC ECOTest 140
Akku 78
- Kosten 175 f.
- Wechsel 42, 106
- Zellfertigung 207
aktiver Bremswiderstand 113
Alterung 85
amorpher Kohlenstoff 79
Amperestunden 92
Anfangsbeschleunigung 211
Angebot Elektrofahrzeuge 179, 208
Anschaffungskosten 172
Anschaffungspreis 26, 174
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 42
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, 172 ff.
Betriebsszenarien 119
Bilanzierungsregeln 146
Bildung und Qualifizierung 207
Bioethanol-Betrieb 139
Biogasanlagen 151 f.
Biomasse 151 f.
Bleiakku 19
Blockheizkraftwerke 152
Braunkohle 146
Bremsen 114
Bremsenergie 39, 128
Brennstoff 139
Brennstoffzelle 39
Brennstoffzellenfahrzeug 38, 163, 192
Brennstoffzellen-Hybridbus 42
Bruttostromerzeugung 143

C

car2go 196
 Carbon Footprint 164
 Carsharing im ländlichen Raum 199
 Carsharing-Konzepte 197
 CCCV-Ladeverfahren (Constant Current, Constant Voltage) 94
 CCS-Ladedose 101
 CCS-System 186
 CHaDemo 96
 CHAdeMO-System 101
 Chamäleon Ladesystem 183
 Citaro Fuel-Cell-Hybrid 41
 CO₂
 - Ausstoß 27, 208
 - Bilanz 134, 164, 166
 - 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
 Differenzialgetriebe 29
 Differenzial 71
 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 196, 198
 Druckleitungen 158
 dynamisches Kräftegleichgewicht 110
 dynamisches Verhalten 210

E

E-Bikes 43
 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 200
 elektrochemische Speicher 156
 Elektrofahrräder 43
 Elektrofahrzeuge 15, 17
 Elektroflugzeuge 50
 Elektroinfrastruktur 96
 Elektro-Lkw 203
 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 208
 Entlade-Schlussspannung 94
 Entsorgung 166
 Erdgas (CNG)-Motoren 51
 Erdgasfahrzeuge 161
 Erdgasspeicher 159
 Erdölangebot 18
 Erhaltungsaufwendungen 172
 erneuerbare Energien 143, 147
 Erneuerbare-Energien-Richtlinie 147
 Erntefaktor 165
 Erzeugungskosten 155
 E-Taxis 199
 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
 Fahrzeugpalette 186
 Fahrzeugschleife 105
 Fahrzyklus 124
 F-Cell-Modell 41
 Feinstaubbelastung 167
 FI-Schalter 102
 Fixkosten 172
 Flotten-Grenzwert 146
 Flottenverbrauch 208
 Flottenwert 169
 Fördermaßnahmen 108
 Fördermittel 194
 Förderprogramm 204
 Formel 1 37
 Forschungsthemen 204
 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten 204,
 207
 fossile Energiequellen 142
 Free-floating-Konzept 199
 free floating system 198
 Frequenz 67
 Frontmotor 44

G

Garantiebedingungen 85
 Gasinfrastruktur 160
 Gaskraftwerke 160
 Gasmotoren 159f.
 Gasmotor-Generator-Kombination 152
 Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität
 (GGEMO) 204
 Genehmigung 124
 Generator 29, 35
 Generatorbetrieb 23
 Geräuschemissionen 196
 Gesamtintegration 87

Gesamtreichweite 46
 Gesamtverbrauch 133
 Gesamtwirkungsgrad 141
 Geschäftsmodelle für Elektromobilität 206
 Geschwindigkeitsbereich 69
 Getriebeabstimmungen 69
 Getriebeübersetzung 73
 Gewicht 131
 Gigafactory 88
 Gleichstrom-Ladestationen 98
 Gleichstrommotoren 61
 Gleichstrom-Schnellladen 96, 186
 Global Warming Potential 164
 Graphen 88
 Graphit 79
 Güterverkehr 42, 190, 201

H

Halbleitermaterial 90
 Haushaltssteckdose 99
 Heckmotor 45
 Heizleistung 137f.
 Heizung 136, 199
 Herstellung 171
 Hochdrucktanks 39
 Hochdruck-Wasserstofftank 192
 Höchstdrehzahl 72
 Hochtemperaturelektrolyse 41
 Hochvoltbatterien 29
 Hybridantriebe 51
 Hybridfahrzeuge 31
 Hybridisierung 32, 209
 Hybridmotor 66

I

In-Cable Control-Box (ICCB) 97
 Induktion 65
 induktives Laden 105
 Infrastruktur 18, 95
 Innenwiderstand 79, 93
 innovatives Design 181
 Intermodalität 206
 Inverter 29, 89
 Isolation 138

K

Kapazität 91
 Kastenwagen 191
 Kaufprämie 194,

Kenndaten Plug-In-Hybride 188
 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 194
 Kosten Plug-In Hybride 175
 Kräftegleichgewicht nach d'Alembert 118
 Kraftfahrt-Bundesamt 168, 178
 Kraftstoffeinsparungen 34
 Kraftstofftank 22
 Kraftstoffverbrauch 34
 Kraft-Wärmekopplung 152
 Kraft-Wärmekopplungstechnik 159
 Kraftwerkspark 143
 Kreisfrequenz 72
 Kühlbedarf 139
 kumulierter Energieaufwand 165
 Kurbelwelle 52 f.
 Kurbelwellen-Startergenerator 33

L

Ladearten 96
 Ladegeräte 29, 90
 Lade-Gleichspannung 90
 Ladeinfrastruktur 194, 199
 Ladekabel 91, 95, 98
 Ladekontrolle 86
 Ladeleistung 99
 Lademodi 96
 Laderate 92
 Laderaumvolumen 191
 Ladesäulen 208
 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 166 f.
 Lastanhebung 57
 Lastmanagement 86
 Lastspitzen 156
 Laufwasserkraftwerke 153
 Lautstärke 24
 Lebensdauer 85, 173
 Lebenszyklus 166
 Leerlaufdrehzahl 69
 Leichtbaumaterialien 181
 Leistungselektronik 89
 Leistungsverlauf 128
 Leistungsverzweigter Hybrid 36
 Leistungszahl 139
 Leitanbieter 207
 Leitanbieter Elektromobilität 204
 Leitmarkt 207
 Leitmarkt Elektromobilität 204
 Leuchtturmprojekte 204 f.
 Li-Ionen-Akku 20
 Li-Luft-Akku 88
 Lithium-Ionen-Akku 51, 78
 Lohner-Porsche 19
 lokal emissionsfreie Fahrzeuge 168
 Luftschadstoffe 166
 Luftwiderstand 77, 111, 118
 Luftwiderstandsbeiwert 131

M

Magnetfeld 63, 65
 Marktdynamik 206
 Markthochlaufphase 207
 Marktvorbereitung 206
 Mautgebühren 194
 maximales Drehmoment 69, 116
 mechanische Antriebsenergie 23
 mechanische Nutzarbeit 56
 mechanischer Antriebsstrang 130
 mechanische Speicher 156
 Mehrwertsteuer 194
 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 196

Mode-4-Gleichstromladung 101
 Modellbildung 210
 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, 209
 nachwachsende Rohstoffe 152
 Näherungslösung 212
 Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität
 15 f., 146, 196, 204
 Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff-
 und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 40
 Natrium-Nickelchlorid-Batterie 78
 NEFZ 124, 133
 NEFZ-Test 126
 NEFZ-Verbrauch 132
 Nennkapazität 136
 Netzstörungen 156
 Neuer Europäischer Fahrzyklus 124
 Neuwagenflotte 168
 Neuzulassungen 194
 Newton'sches Gesetz 109
 Nickel-Metallhydrid-Akku 78
 Niederspannungs-Bordnetz 89
 Nippon Charge Service 104
 Nockenwelle 53
 Nullemissionsfahrzeuge 168
 Nutzfahrzeuge 42, 190
 Nutzungsdauer 172
 Nutzungsfrequenz 108
 Nutzungsphase 164
 Nutzungsverhalten 157

O

Offshore-Anlagen 151
 Ökobilanz 170 f.,
 Ökosysteme 165
 Ölressourcen 146
 ÖPNV-Angebote 199
 Ottomotor 19, 51, 55

P

Paketzustellung 201
 parallele Struktur 35
 Pedal Electric Cycle 43
 permanentmagneterregte Synchronmotoren
 64
 Photoelektrischer Effekt 148
 Photovoltaik 148
 Photovoltaik-Anlagen 149
 Pkw-Kaufsteuer (BPM) 194
 Planetengetriebe 74
 Plug-In-Hybride 17, 34, 134, 208
 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 170
 Prüfzyklus 126
 PTC 138
 Pufferung 157
 Pumpspeicherkraftwerke 153, 158
 Purpose-Design 20
 Purpose-System 22

Q

Querschnittsfläche 131

R

Radnabenmotoren 19, 67
 Rahmenbedingungen 194
 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 17, 84, 208
 Reichweitenverlängerung 31
 Reichweitenverminderung 138
 Reichweite von Elektrofahrrädern 46
 Reifen-Fahrbahngeräusche 167

Rekuperation 23, 29, 61, 114, 34, 120
 Restkapazität 123
 Restwert 174
 Rollreibung 118
 Rotation 71, 109
 Rotor 61
 Rückgewinnung von Energie 114
 Rundzellen 82

S

Schadstoffbelastung 167
 Schadstoffe 24
 Schaltgetriebe 24
 Schaltkupplung 24
 Schaufenster Elektromobilität 206
 Schleifkontakte 63
 schnelle Pedelecs 43
 Schnellademöglichkeit 208
 Schrittweite 77
 Schubtrieb 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, 210, 213
 SLAM 103
 smart grid 157
 Solarstrom 149
 Solarzellen 139
 Sommersmogpotential 165
 Speicherbecken 158
 Speicherseen 154
 Speichertank 40
 spezifischer Kraftstoffverbrauch 54
 Spitzenschwankungen 157
 staatliche Förderung 193
 Stadtfahrzeug 184
 Startdrehzahlen 69
 Starterbatterie 33
 Startergenerator 33
 Start-Stopp-Automatik 33, 125
 stationsunabhängiges Carsharing
 197

Stator 61
 Stautufen 153
 Steckverbindung 100
 Steckvorrichtung 98
 Steigung 111
 Steigungswiderstand 77, 118
 Steuer 173
 Steuererleichterungen 194
 Steuerungselektronik 25
 Stirnradgetriebe 74
 Stoppzeiten 125
 Strafzahlungen 169
 Strahlungswärmeeintrag 138
 Stromangebot 209
 Strombedarf 155
 stromerregte Synchronmotoren 64
 Stromerzeugung 24, 155
 Strommarkt 155
 Strommix Deutschland 143
 Stromspeicher 157
 Stromtankstellen 40
 Stromüberschuss 155
 Stromversorger 155
 Subventionsprogramm 194
 Supercharger 103
 Supercredits 169
 Synchronmaschine 63
 Synchronmotor 61, 63, 66
 synthetisches Gas 161
 Systemkosten 88
 Systemleistung 175

T

Tank-to-Wheel 24
 Tank-to-Wheel-Betrachtung 142
 Tankvorgang 40, 192
 Terrestrische Solarkonstante 149
 thermische Massen 138
 Tiefentladen 81
 Tiefentladungspunkt 85
 Toleranzausgleich 82
 Total Cost of Ownership 172
 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, 127, 132
 - Simulationen 116
 - Vorteile 54
 - Wert 129, 134
 Verbrauchsangabe 126
 Verbreitung von Elektrofahrzeugen 172, 176
 Verbrennungsgase 53
 Verbrennungsmotor 17, 19, 51
 Verdichtung 53
 Vereinte Nationen 126
 Verfügbarkeit 157
 Vergleichsfahrzeug 170
 Verluste 122
 Versauerungspotenzial 165
 Verschleißreparaturen 172
 Verwertungsphase 164
 Verzögerungsphasen 125
 Viertaktmotor 52
 Viertakt-Zyklen 53
 Vollhybrid 33
 Vorkonditionierung 139
 Vor-Ort-Betrachtung 168

W

Wachstum 178
 Wallbox 97

Wärmepumpe 139
 Wärmeregelsystem 126
 Wärmetauscher 138
 Wärmeverluste 93
 Warngeräusche 25
 Wartungs- und Werkstattkosten 172 f.
 Wasserkraft 153
 Wasserkraftwerke 154
 Wasserstoff 38 f., 160
 Wasserstoffgewinnung 40
 Wasserstofftankstellen 40
 Wattstunden 92
 Wechselakku 30, 106
 Wechselrichter 29, 148
 Wegfahrsperrung 102
 Weiterentwicklung Akkus 88
 Well-to-Wheel 24
 Well-To-Wheel-Betrachtung 140
 Werkstattkosten 174
 Wertverlust 173
 Widerstandskurven 117
 Wiederverwendung 166
 Windanlagen an Land 151
 Windeinflüsse 126
 Windenergieanlagen 150
 Wirkungsabschätzungen 165
 Wirkungsgrad 57, 130
 Wirtschaftlichkeit 18, 108
 Wirtschaftskommission für Europa
 124
 World Light Duty Test Procedure (WLTP)
 126, 140

Z

Zeitschritte 213
 Zellenherstellung 87
 Zentralmotoren 67
 Zero Emission Vehicle 23
 Zugangsberechtigung 102
 Zulassungszahlen 169, 194
 Zündkerze 53
 Zusatzheizung 138 f.
 Zusatzverbraucher 136
 Zwangsbelüftung 139
 Zweitnutzung 157
 Zweit- oder Drittfahrzeuge 199
 Zwischenspeicherung 114
 Zyklen-Alterung 85
 Zyklus 124
 Zylinder 52