



Leseprobe

Anton Karle

Elektromobilität

Grundlagen und Praxis

ISBN (Buch): 978-3-446-44339-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-44417-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44339-6>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

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

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

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

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

Wie anfangs angedeutet, spielt auch die Politik eine entscheidende Rolle für die künftige Entwicklung. Nicht nur wegen der erwähnten Zielvorgabe, die begleitet wird von entsprechenden Fördermaßnahmen. Viel einflussreicher wirken sich entsprechende gesetzliche Vorgaben und Verordnungen aus. Hier wären zu nennen die Bestimmungen zum Flottenverbrauch und dem dazugehörenden zulässigen CO₂-Ausstoß der Fahrzeugflotten der Hersteller. Fachleute sagen, dass die dort festgelegten Grenzwerte ohne eine verbreitete Elektrifizierung des Antriebsstrangs wohl nicht erreicht werden können. Solche Vorgaben werden nicht mehr nur national bestimmt, sondern von der EU europaweit festgelegt. Vergleichbare Vorschriften gibt es auch in den meisten Nicht-EU-Ländern, in welche die Fahrzeuge der wichtigsten Hersteller verkauft werden. Hier zeigt sich sehr deutlich eine internationale Verflechtung von Politik, Industrie und dem Marktgeschehen.

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

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

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

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

Furtwangen, März 2015

Anton Karle

Inhalt

1	Einführung	13
2	Überblick Elektrofahrzeuge	17
2.1	Geschichte und grundsätzliche Bedeutung	17
2.2	Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug	18
2.3	Die Vorteile des Elektroantriebs	21
2.4	Die Nachteile des Elektroantriebs	23
2.5	Vorgaben zur CO ₂ -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	24
3	Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis	26
3.1	Elektro-Pkw	26
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge	26
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV)	28
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV)	29
3.1.3.1	Mikrohybrid	31
3.1.3.2	Mildhybrid	31
3.1.3.3	Vollhybrid	31
3.1.3.4	Plug-In-Hybride	32
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride	33
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1	35
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug	36
3.1.3.8	Funktion der Brennstoffzelle	37
3.1.3.9	Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug	38
3.1.3.10	Wasserstoffversorgung	38
3.1.3.11	Wie wird der Wasserstoff produziert?	39
3.1.3.12	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge	39
3.2	Elektrobusse	40
3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge	41
3.4	Elektrofahrräder	42
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern	42
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern	45
3.5	Weitere Elektrofahrzeuge	46
3.5.1	Segway	46
3.5.2	Elektro-Motorräder	47
3.5.3	Elektro-Flugzeuge	48

4	Grundlagen Kfz-Antriebe	49
4.1	Übersicht Antriebe	49
4.2	Verbrennungsmotor	49
4.2.1	Funktion Viertaktmotor	50
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungsmotors	52
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch	54
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen	55
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld	57
5	Elektrifizierter Antriebsstrang	58
5.1	Elektromotor	58
5.1.1	Anforderungen	58
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren	59
5.1.3	Gleichstrommotor	59
5.1.4	Drehstrommotor	61
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektro kraftfahrzeugen	64
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe	66
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb	68
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs	69
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl	70
5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung	71
5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors	72
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft	74
5.2	Energiespeicher Akku	75
5.2.1	Grundlagen und Begriffe	75
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku	76
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakku	78
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektrofahrzeugen	81
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus	82
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS)	83
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus	84
5.2.4	Hersteller	85
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Akkus	85
5.3	Leistungselektronik, Inverter	86

6	Laden und Ladeinfrastruktur	88
6.1	Grundlagen Akkuladen	88
6.1.1	Die Laderate	88
6.1.2	Kapazität des Akkus	89
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah)	89
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad	89
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen	90
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus	91
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen	92
6.2.1	Ladearten und Lademodi	93
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer	95
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen	96
6.2.4	Sicherheit beim Laden	98
6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur	98
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten	100
6.4.1	Induktives Laden	100
6.4.2	Wechselakku	101
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid	102
6.4.4	Dichte von Ladestationen	103

7	Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen	104
7.1	Physikalische Grundlagen	104
7.1.1	Berechnungsgrößen	104
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeug- bewegung	105
7.1.3	Energie und Verbrauch	107
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände	108
7.2	Verbrauchssimulationen	110
7.2.1	Einflussgrößen	110
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	111
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch	111
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch	114
7.3	Verbrauch Elektrofahrzeuge im NEFZ	118
7.3.1	Der NEFZ-Fahrzyklus	118
7.3.2	NEFZ-Verbrauchssimulationen	121
7.3.3	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktionsparameter	125
7.3.4	NEFZ-Verbrauch bei Plug-In-Hybriden	127
7.3.5	Elektrische Reichweite (NEFZ)	130
7.3.6	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite	131
7.3.6.1	Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen	131
7.3.6.2	Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung	133
7.3.7	Alternative Messzyklen und Übertragbarkeit der NEFZ-Messwerte auf reale Fahrsituationen	134
7.4	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen	136

8	Strom für die Elektrofahrzeuge	137
8.1	Energieerzeugung	137
8.1.1	Primärenergiequellen	137
8.1.2	Der Strommix Deutschland	138
8.1.3	Erneuerbare Energien	141
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen	143
8.1.3.2	Windenergie	145
8.1.3.3	Strom aus Biomasse	147
8.1.3.4	Wasserkraft	149
8.2	Speicherung von Strom	150
8.2.1	Speichertechnologien	151
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher	152
8.2.2.1	Akkumulatoren	152
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke	153
8.2.2.3	Erdgasspeicher	154
8.2.2.4	Power-to-Gas	155
9	Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	159
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz	159
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge	161
9.3	Nutzungsphase	161
9.3.1	Lärm	162
9.3.2	Luftschadstoffe	162
9.3.3	CO ₂ -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	163
9.4	Ökobilanz der Mercedes-Benz-B-Klasse Electric Drive	165
10	Markt	167
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	167
10.1.1	Anzusetzende Kosten	167
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor- Fahrzeug	168
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	171
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	171
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge	174
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	174
10.2.2.2	Plug-In-Hybride	181
10.2.2.3	Nutzfahrzeuge	183
10.2.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	185
10.3	Staatliche Förderung	185
10.4	Schlussfolgerungen Markt	187

11	Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	188
11.1	Carsharing	188
11.1.1	car2go	188
11.1.2	DriveNow	190
11.1.3	Carsharing im ländlichen Raum	190
11.2	E-Taxis	191
11.3	Elektrobusse	192
11.4	Güterverkehr	193
11.4.1	Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	193
11.4.2	Elektro-Lkw	194
12	Förderung der Elektromobilität in Deutschland	195
12.1	Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte	195
12.2	Schaufenster für Elektromobilität	196
12.3	NPE-Fortschrittsbericht 2014	197
13	Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	199
14	Workshop Simulation	201
	Glossar	207
	Verzeichnis Bildquellen	211
	Literatur	213
	Index	217

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.

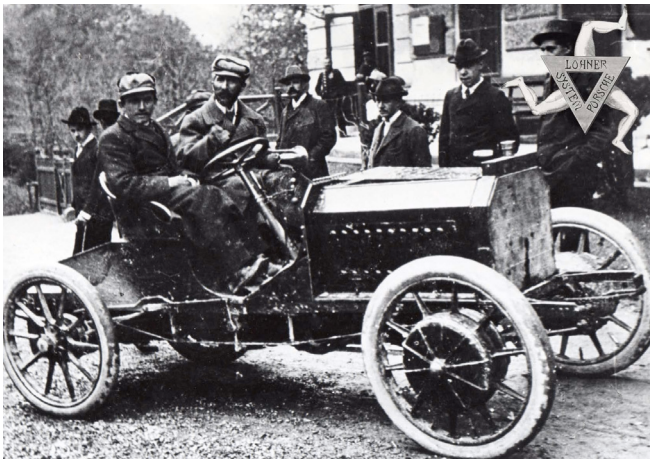


Bild 2.1 Ferdinand Porsche (Fahrer) und Ludwig Lohner (Beifahrer) im Lohner-Porsche.
Quelle: Archiv Familie Lohner

Da die Reichweite der Benzinmotoren deutlich größer war, setzten sich diese – wie hinlänglich bekannt – überaus erfolgreich durch.

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.

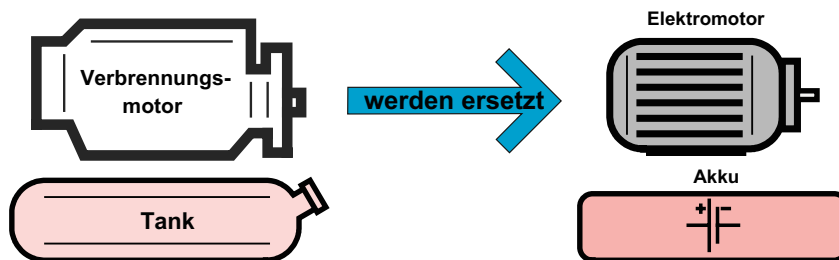


Bild 2.6 Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt.

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

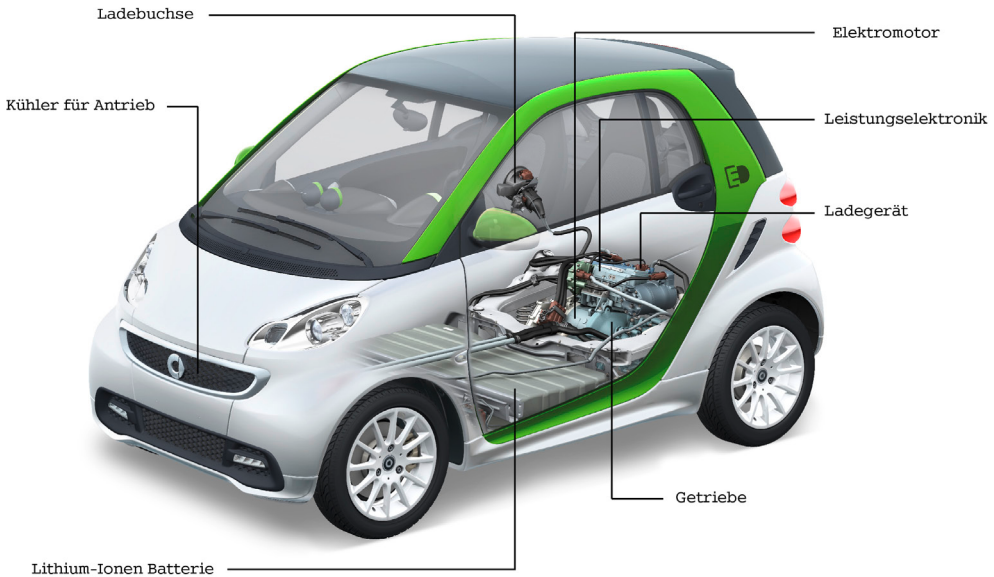


Bild 2.7 smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku.
Quelle: Daimler AG

■ 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, ab 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.

Index

A

Abbremsen 117
Abhol- und Abgabestation 191
Abrechnungsmodalitäten 99
Abrechnungssystem 98
Abwärme 131
AC-Laden 96
AC-Schnellladung 98
ADAC-Autobahnzyklus 135
ADAC ECOTest 134
Akku 75
– Kosten 170
– Wechsel 41, 101
– Zellfertigung 198
aktiver Bremswiderstand 108
Alterung 82
amorpher Kohlenstoff 77
Amperestunden 89
Anfangsbeschleunigung 202
Angebot Elektrofahrzeuge 174, 199
Anschaffungskosten 167
Anschaffungspreis 23, 169
Antriebsakkus 82
Antriebsenergie 107
Antriebskonzepte 107
Antriebskraft 70, 73, 105, 111
Antriebsmoment 73, 105
Antriebsstrang 20
Asynchronmaschine 61
Asynchronmotor 59, 63
Auslassventil 51
Ausrollversuche 121
Automatikgetriebe 22

B

Ballungsräume 134
Batterieelektrische Fahrzeuge 26
Batteriegehäuse 79
Batterieherstellung 161
Batterie-Management-System 44, 83, 91

Batteriewechsel 41
battery electric vehicles 75
Beschleunigung 105
– Kraft 105
– Profil 114
– Werte 120
– Widerstand 112
Bestpunkt 53
Bestpunkt-Drehzahl 55
Betriebskosten 24, 167, 168, 169, 170
Betriebsszenarien 113
Bilanzierungsregeln 141
Bildung und Qualifizierung 198
Bioethanol-Betrieb 134
Biogasanlagen 147, 148
Biomasse 147, 148
Bleiakku 17
Blockheizkraftwerke 147
Braunkohle 141
Bremsen 108
Bremsenergie 37, 122
Brennstoff 134
Brennstoffzelle 37
Brennstoffzellenfahrzeug 36, 158,
185
Brennstoffzellen-Hybridbus 40
Bruttostromerzeugung 138

C

car2go 188
Carbon Footprint 159
Carsharing im ländlichen Raum 190
Carsharing-Konzepte 189
CCCV-Ladeverfahren (Constant Current,
Constant Voltage) 90
CCS-Ladedose 97
CCS-System 179
CHaDemo 92
CHaDeMO-System 97
Chamäleon Ladesystem 176
Citaro Fuel-Cell-Hybrid 40

CO₂
 – Ausstoß 25, 199
 – Bilanz 129, 159, 161
 – Emissionen 141
 – Flottenausstoß 129
 – Grenzwerte 25
 – Reduktion 24
 Coefficient of Performance 134
 Combined Charging System (CCS) 92, 97
 Combo-2-Stecker 97
 Combo-System 95
 Conversion Design 19
 Coulomb-Wirkungsgrad 89
 Crashtests 84
 cw-Wert 126

D

Dauerleistung 66
 Dauermagneten 60
 DC-High-Ladung 95, 97
 DC-Low-Ladung 95
 Dieselmotor 49, 53
 Differentialgetriebe 27
 Differenzial 69
 Direkteinspritzer 51
 Drehbeschleunigung 104
 Drehmassen 106
 Drehmassenzuschlagsfaktor 109
 Drehstrom 65
 Drehstrommotor 61, 64
 Drehstromnetz 26
 Drehzahlbereich 67
 Drehzahl-Drehmomentverhalten 66
 Drehzahl- und Drehmomentsteuerung 59
 DriveNow 188, 190
 Druckleitungen 153
 dynamisches Kräftegleichgewicht 105
 dynamisches Verhalten 201

E

E-Bikes 42
 Eckdrehzahl 67
 Effizienz des Elektroantrieb 125
 e-gas 157
 Einsparpotential 125
 Einspritzzeitpunkt 51
 elektrifizierter Antriebsstrang 58
 elektrische Reichweite 129, 130
 elektrische Speicher 151

Elektroantrieb 15
 Elektrobusse 40
 Elektrobussenverkehr 192
 elektrochemische Speicher 151
 Elektrofahrräder 42
 Elektrofahrzeuge 13, 15
 Elektro-Flugzeuge 48
 Elektroinfrastruktur 92
 Elektro-Lkw 194
 Elektrolyse 37, 155
 Elektromagnet 60
 Elektromotor 58
 Elektro-Motorräder 47
 Elektro-Pkw 26
 Elektro-Scooter 47
 energetische Amortisationszeit 160
 Energiebilanz 54, 116
 Energie des Kraftstoffs 54
 Energiedichte 78, 82
 Energieeffizienz 29, 87
 Energieerhaltungssatz 69, 72
 Energiegehalt 54, 124
 Energiespeicher 29, 75, 102, 128, 151
 Energieverbrauch 15, 107, 113
 Energiewandler 29
 Energiewende 199
 Entlade-Schlussspannung 91
 Entsorgung 161
 Erdgas (CNG)-Motoren 49
 Erdgasfahrzeuge 156
 Erdgasspeicher 154
 Erdölangebot 16
 Erhaltungsaufwendungen 167
 erneuerbare Energien 137, 142
 Erneuerbare-Energien-Richtlinie 142
 Erntefaktor 160
 Erzeugungskosten 151
 E-Taxis 191
 EU-Ladestecker 96
 EU-Strommix 166
 Eutrophierung 160

F

Fahrkomfort 27
 Fahrmodus 44
 Fahrprofil 136
 Fahrstabilität 20
 Fahrwiderstand 105
 Fahrwiderstandskurven 112
 Fahrzeugakku 75

Fahrzeugbeschleunigung 74, 110
Fahrzeugbremse 115
Fahrzeugelektronik 86
Fahrzeugflotten 101
Fahrzeugheizung 24
Fahrzeugklassen 119
Fahrzeugmasse 126
Fahrzeugpalette 179
Fahrzeugspule 100
Fahrzyklus 119
F-Cell-Modell 40
Feinstaubbelastung 162
FI-Schalter 98
Fixkosten 167
Flotten-Grenzwert 141
Flottenverbrauch 199
Flottenwert 164
Fördermaßnahmen 103
Fördermittel 187
Förderprogramm 195
Formel 1 35
Forschungsthemen 195
Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten
195, 198
fossile Energiequellen 137
Free-floating-Konzept 191
free floating system 190
Frequenz 65
Frontmotor 42

G

Garantiebedingungen 82
Gasinfrastruktur 155
Gaskraftwerke 155
Gasmotoren 155
Gasmotor-Generator-Kombination 147
Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität
(GGEMO) 195
Genehmigung 118
Generator 27, 33
Generatorbetrieb 21
Geräuschemissionen 188
Gesamtintegration 85
Gesamtreichweite 45
Gesamtverbrauch 128
Gesamtwirkungsgrad 136
Geschäftsmodelle für Elektromobilität 197
Geschwindigkeitsbereich 67
Getriebeabstimmungen 67
Getriebeübersetzung 71

Gewicht 125
Gigafactory 86
Gleichstrom-Ladestationen 95
Gleichstrommotoren 59
Gleichstrom-Schnellladen 92, 179
Global Warming Potential 159
Grafit 77
Graphen 86
Güterverkehr 41, 183, 193

H

Halbleitermaterial 87
Haushaltssteckdose 95
Heckmotor 43
Heizleistung 131, 132
Heizung 131, 191
Herstellung 166
Hochdrucktanks 38
Hochdruck-Wasserstofftank 185
Höchstzahl 70
Hochtemperatur elektrolyse 39
Hochvoltbatterien 27
Hybridantriebe 49
Hybridfahrzeuge 29
Hybridisierung 30, 200
Hybridmotor 64

I

In-Cable Control-Box (ICCB) 93
Induktion 63
induktives Laden 100
Infrastruktur 16, 91
Innenwiderstand 77, 90
innovatives Design 175
Intermodalität 197
Inverter 27, 86
Isolation 133

K

Kapazität 88
Kastenwagen 184
Kaufprämien 187
Kenndaten Plug-In-Hybride 182
KERS 35
Kfz-Antriebe 49
kinetische Energie 116
Klimaanlage 131
Klimaschädlichkeit 163

Klimatisierung 79, 133
 Kollektor 61
 Kommunikationsmodul 94
 Kommutator 60
 Kompaktklasse 110, 124
 Komponententests 84
 konduktives Laden 100
 konventionelle Kraftwerke 150
 kostenloses Parken 186
 Kosten Plug-In Hybride 171
 Kräftegleichgewicht nach d'Alembert 112
 Kraftfahrt-Bundesamt 163, 172
 Kraftstoff einsparungen 32
 Kraftstofftank 20
 Kraftstoffverbrauch 32
 Kraft-Wärmekopplung 147
 Kraft-Wärmekopplungstechnik 155
 Kraftwerkspark 138
 Kreisfrequenz 70
 Kühlbedarf 133
 kumulierter Energieaufwand 160
 Kurbelwelle 50, 51
 Kurbelwellen-Startergenerator 31

L

Ladearten 93
 Ladegeräte 27, 87
 Lade-Gleichspannung 87
 Ladeinfrastruktur 186, 191
 Ladekabel 88, 91, 94
 Ladekontrolle 83
 Ladeleistung 95
 Lademodi 92
 Laderate 88
 Laderaumvolumen 184
 Ladesäulen 199
 Ladeschlussspannung 83, 91
 Ladespule 100
 Ladestationen 103
 Ladestrom 78
 Ladeszenarien 95
 Lade- und Entladekurve 89
 Ladeverfahren 90
 Ladeverluste 131
 Ladevorgang 83
 Ladezyklen 78, 85
 Lärm 161, 162
 Lastanhebung 55
 Lastmanagement 83
 Lastspitzen 152

Laufwasserkraftwerke 149
 Lautstärke 22
 Lebensdauer 82, 168
 Lebenszyklus 161
 Leerlaufdrehzahl 67
 Leichtbaumaterialien 175
 Leistungselektronik 86
 Leistungsverlauf 123
 Leistungsverzweigter Hybrid 34
 Leistungszahl 134
 Leitanbieter 197, 198
 Leitanbieter Elektromobilität 195
 Leitmarkt 197, 198
 Leitmarkt Elektromobilität 195
 Leuchtturmprojekte 195, 196
 Li-Ionen-Akkus 18
 Li-Luft-Akkus 86
 Lithium-Ionen-Akku 49, 76
 Lohner-Porsche 17
 lokal emissionsfreie Fahrzeuge 163
 Luftschadstoffe 161
 Luftwiderstand 74, 106, 112
 Luftwiderstandsbeiwert 125

M

Magnetfeld 61, 63
 Marktdynamik 197
 Markthochlaufphase 198
 Marktvorbereitung 197
 Mautgebühren 186
 maximales Drehmoment 67, 111
 mechanische Antriebsenergie 21
 mechanische Nutzarbeit 54
 mechanischer Antriebsstrang 125
 mechanische Speicher 151
 Mehrwertsteuer 186, 187
 Memoryeffekt 77, 91
 Messzyklen 128
 Methangas 147
 Methanisierung 156
 MGU-H 35
 MGU-K 35
 Mikrohybrid 31
 Mildhybrid 31
 Mischhybrid-Struktur 33
 Mittelmotoren 44
 Mobilitätskonzepte 188
 Mode-4-Gleichstromladung 97
 Modellbildung 201
 Modellrechnungen 16

Modul 79
Momentengleichgewicht 72
Motor
– Auslegung 69
– Drehmoment 55, 57
– Geräusch 162
– Leistung 57
– Reibung 115
multimodales Verkehrssystem 14
Muschel-Diagramm 53

N

nachhaltige Mobilität 141, 200
nachwachsende Rohstoffe 147
Näherungslösung 203
Nationaler Entwicklungsplan
 Elektromobilität 13, 14, 141, 188, 195
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff-
 und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 39
Natrium-Nickelchlorid-Batterie 76
NEFZ 118, 128
NEFZ-Test 121
NEFZ-Verbrauch 127
Nennkapazität 131
Netzstörungen 152
Neuer Europäischer Fahrzyklus 118
Neuwagenflotte 163
Neuzulassungen 186
Newton'sches Gesetz 104
Nickel-Metallhydrid-Akku 76
Niederspannungs-Bordnetz 86
Nippon Charge Service 99
Nockenwelle 51
Nullemissionsfahrzeuge 163
Nutzfahrzeuge 41, 183
Nutzungsdauer 167
Nutzungsfrequenz 103
Nutzungsphase 159
Nutzungsverhalten 152

O

Offshore-Anlagen 146
Ökobilanz 159, 165, 166
Ökosysteme 160
Ölressourcen 141
ÖPNV-Angebote 191
Ottomotor 17, 49, 53

P

Paketzustellung 193
parallele Struktur 33
Pedal Electric Cycle 42
permanentmagneterregte Synchronmotoren
 62
Photoelektrischer Effekt 143
Photovoltaik 143
Photovoltaik-Anlagen 144
Pkw-Kaufsteuer (BPM) 186
Planetengetriebe 72
Plug-In-Hybride 15, 32, 129, 199
Polymer 77
Pouch-Zellen 80
Power-to-Gas 155
Primärenergiequellen 137
Prinzip von d'Alembert 104
prismatische Zellen 80
Proton exchange membrane fuel cell 37
Prüffahrzeug 120
Prüfstelle 165
Prüfzyklus 121
PTC 133
Pufferung 153
Pumpspeicherkraftwerke 149, 153
Purpose-Design 18
Purpose-System 20

Q

Querschnittsfläche 125

R

Radnabenmotoren 17, 65
Rahmenbedingungen 186
Range Extender 28, 33
Range-Extender-Motor 28
Realfahrten 135
Real-Reichweite 131
Recycling 68, 161
Regelbarkeit 61
Regelung Nr. 101 118
Regelung Nr. 101 (ECE R101) 128
regenerativ erzeugter Strom 15
Reibung 74, 106
Reibungsverluste 108
Reichweite 16, 82, 199
Reichweitenverlängerung 29
Reichweitenverminderung 133

Reichweite von Elektrofahrrädern 45
 Reifen-Fahrbahngeräusche 162
 Rekuperation 21, 27, 33, 59, 108, 114, 122
 Reluktanzmotor 64
 Restkapazität 117
 Restwert 169
 Rollreibung 112
 Rotation 69, 104
 Rotor 59
 Rückgewinnung von Energie 109
 Rundzellen 80

S

Schadstoffbelastung 162
 Schadstoffe 22
 Schaltgetriebe 22
 Schaltkupplung 22
 Schaufenster Elektromobilität 196
 Schleifkontakte 61
 schnelle Pedelecs 42
 Schnelllademöglichkeit 199
 Schrittweite 75
 Schubbetrieb 108
 Schutzschaltung 90, 91
 schwarzstartfähig 153
 Second Life 153
 Segway 46
 Selbstentladung 77
 Selbstzündung 51
 serielle Struktur 33
 Service-Aufwand 23
 Service-Kosten 23
 Sicherheit 82, 84
 Sicherheitsüberwachung 83
 Silizium 86
 Siliziumkarbid 87
 Simulation 107, 124, 201, 204
 SLAM 99
 smart grid 152
 Solarstrom 144
 Solarzellen 133
 Sommersmogpotential 160
 Speicherbecken 153
 Speicherseen 149
 Speichertank 38
 spezifischer Kraftstoffverbrauch 52
 Spitzenschwankungen 153
 staatliche Förderung 185
 Stadtfahrzeug 177

Startdrehzahlen 67
 Starterbatterie 31
 Startergenerator 31
 Start-Stopp-Automatik 31, 120
 stationsunabhängiges Carsharing 189
 Stator 59
 Staustufen 149
 Steckverbindung 96
 Steckvorrichtung 94
 Steigung 106
 Steigungswiderstand 74, 112
 Steuer 168
 Steuererleichterungen 187
 Steuerungselektronik 23
 Stirnradgetriebe 72
 Stoppzeiten 120
 Strafzahlungen 164
 Strahlungswärmeeintrag 133
 Stromangebot 200
 Strombedarf 150, 151
 stromerregte Synchronmotoren 62
 Stromerzeugung 22, 150, 151
 Strommarkt 150
 Strommix Deutschland 138
 Stromspeicher 152
 Stromtankstellen 39
 Stromüberschuss 151
 Stromversorger 150
 Subventionsprogramm 187
 Supercharger 99
 Supercredits 164
 Synchronmaschine 61
 Synchronmotor 59, 62
 synthetisches Gas 156
 Systemkosten 86
 Systemleistung 171

T

Tank-to-Wheel 22
 Tank-to-Wheel-Betrachtung 137
 Tankvorgang 38, 185
 Terrestrische Solarkonstante 144
 thermische Massen 133
 Tiefentladen 78
 Tiefentladungspunkt 83
 Toleranzausgleich 79
 Total Cost of Ownership 167
 Trägheitskraft 74
 Translation 69, 104
 Translationsbeschleunigung 104

Translations-Energie 106
Treibhaus-Effekt 133
Treibhausgase 159
Treibhauspotential 159
Tretlagermotor 44
Turbinen 149
Typ 2 96
Typ-2-Stecker 96
Typen für Steckverbindungen 96

U

Überlastschutz 98
Überschussstrom 155
UMBRela 161
Umfangsgeschwindigkeit des Rades 71
Umrichter 27
umrichtergespeister Drehstrommotor 26
Umweltbelastung 137
Umweltbilanz 159
Umweltmanagement 160
Untersetzungsgetriebe 22, 27
Untertagespeicher 154

V

Vehicle to Grid 102
Verbrauch
– Berechnungen 136
– Kennfeld 52, 53
– Messungen 130
– Simulationen 110
– Vorteile 52
– Wert 124, 199
Verbrauchsangabe 120
Verbreitung von Elektrofahrzeugen 167, 171
Verbrennungsgase 51
Verbrennungsmotor 15, 17, 49
Verdichtung 51
Vereinte Nationen 121
Verfügbarkeit 152
Vergleichsfahrzeug 165
Verluste 116
Versauerungspotenzial 160
Verschleißreparaturen 167
Verwertungsphase 159
Verzögerungsphasen 120
Viertaktmotor 50
Viertakt-Zyklen 51
Vollhybrid 31

Vorkonditionierung 134
Vor-Ort-Betrachtung 163

W

Wachstum 172
Wallbox 93
Wärmepumpe 134
Wärmeregelsystem 120
Wärmetauscher 133
Wärmeverluste 90
Warngeräusche 22
Wartungs- und Werkstattkosten 167, 168
Wasserkraft 149
Wasserkraftwerke 149
Wasserstoff 36, 38, 155
Wasserstoffgewinnung 39
Wasserstofftankstellen 39
Wattstunden 89
Wechselakku 28, 101
Wechselrichter 27, 143
Wegfahrsperrung 98
Weiterentwicklung Akkus 85
Well-to-Wheel 22
Well-To-Wheel-Betrachtung 134
Werkstattkosten 169
Wertverlust 168
Widerstandskurven 111
Wiederverwendung 161
Windanlagen an Land 146
Windeinflüsse 121
Windenergieanlagen 145
Wirkungsabschätzungen 160
Wirkungsgrad 55, 125
Wirtschaftlichkeit 16, 103
Wirtschaftskommission für Europa 118
World Light Duty Test Procedure (WLTP) 121, 135

Z

Zeitschritte 204
Zellenherstellung 85
Zentralmotoren 65
Zero Emission Vehicle 21
Zugangsberechtigung 98
Zulassungszahlen 164, 186
Zündkerze 51
Zusatzheizung 133, 134

Zusatzverbraucher 131

Zwangsbelüftung 133

Zweitnutzung 153

Zweit- oder Drittfahrzeuge 191

Zwischenspeicherung 108

Zyklen-Alterung 82

Zyklus 119

Zylinder 50