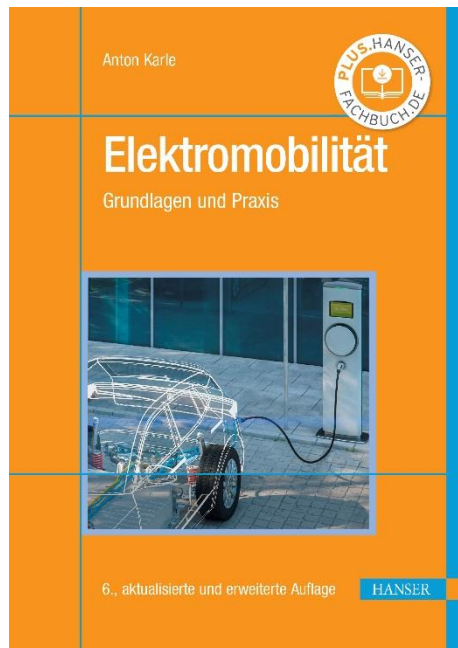


HANSER



Leseprobe

zu

Elektromobilität

von Anton Karle

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446475083>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

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

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

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

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

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

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

Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Furtwangen, März 2015

Anton Karle

■ Vorwort zur 6. Auflage

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

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

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

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

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

Furtwangen, Juni 2022

Anton Karle

1

Einführung

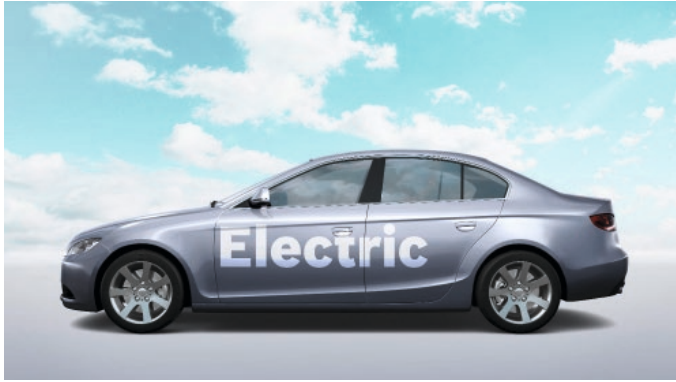
Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

Unter Elektromobilität versteht man den Personen- und Güterverkehr mit Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden. Strenggenommen zählt dazu auch die Eisenbahn, die in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Schwerpunktmäßig befasst sich das Buch mit Elektrofahrzeugen/Elektroautos/Elektromobilen/E-Fahrzeugen, wie sie häufig etwas uneinheitlich bezeichnet werden. Aber auch Elektrofahrräder und -motorräder sowie Elektrobusse gehören dazu, sie werden kurz beschrieben.

Zur genauen Definition der Elektrofahrzeuge wird eine Aufteilung angeführt, die im *Nationalen Entwicklungsplan zur Elektromobilität* der Bundesregierung von 2009 festgelegt ist. Es sind danach folgende Fahrzeuge, die von (mindestens) einem Elektromotor angetrieben werden:

Tabelle 1.1 Typen von Elektrofahrzeugen

Fahrzeugtyp	Englische Bezeichnung	Beschreibung
(Reines) Elektrofahrzeug	Battery Electric Vehicle (BEV)	Antrieb mit Elektromotor und mit am Netz aufladbarem Akku (Batterie)
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (= mit Range Extender, REX)	Range Extended Electric Vehicle (REEV)	Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung des Akkus
Plug-in-Hybridfahrzeug	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	Kombination Elektroantrieb und Verbrennungsmotor, Akku am Netz aufladbar
Hybridfahrzeug	Hybrid Electric Vehicle (HEV)	Verbrennungsmotor plus Elektromotor, Akku nicht am Netz aufladbar
Brennstoffzellenfahrzeug	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV)	Elektromotor plus Brennstoffzelle zur Energieerzeugung

**Bild 1.1**

Studie eines Elektrofahrzeugs. Quelle: Robert Bosch GmbH

Warum und wie unterstützt die Bundesregierung Elektromobilität?

Nach Ansicht der Bundesregierung ist die Elektrifizierung der Antriebe ein ganz wesentlicher Baustein für eine zukunftsfähige Mobilität. Sie bietet die Chance, die Abhängigkeit vom Öl zu reduzieren, die Emissionen zu minimieren und die Fahrzeuge besser in ein multimodales Verkehrssystem zu integrieren.

Dazu wurde gemeinsam mit Fachleuten der bereits erwähnte *Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität* ausgearbeitet. Sein Ziel war und ist es, die Forschung und Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Der Plan ist im Einklang mit ähnlichen Umsetzungsplänen unserer europäischen Nachbarländer sowie der USA, Japan und China.

Gegenstand des *Nationalen Entwicklungsplans* sind die reinen Elektrofahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung und die Plug-in-Hybridfahrzeuge. Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge sind zwar nicht direkt Gegenstand des Nationalen Entwicklungsplans, allerdings entsteht auch für sie ein Nutzen durch entsprechende Synergieeffekte.

Zur Unterstützung der Umsetzung des Entwicklungsplans wurde 2010 als Beratungsgremium der Bundesregierung die *Nationale Plattform Elektromobilität*, NPE, gegründet. Das Gremium beobachtete und analysierte die Entwicklungen im Bereich Elektromobilität. Daraus wurden Empfehlungen abgeleitet, wie die Ziele des *Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität* erreicht werden können. Zusammengefasst wurden die Erkenntnisse in Fortschrittsberichten an die Bundesregierung, im Juni 2012 und im Dezember 2014 sowie zuletzt im Jahr 2018. Die Tätigkeit der *Nationalen Plattform Elektromobilität* wurde **zum 31. Dezember 2018 beendet** und die Themen in die Struktur der *Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)* überführt.

Mitglieder waren etwa 20 hochrangige Experten, die in Arbeitsgruppen folgende wichtige Themen bearbeiteten:

- Antriebstechnologie,
- Batterietechnologie,
- Ladeinfrastruktur und Netzintegration,
- Normung, Standardisierung und Zertifizierung,
- Materialien und Recycling,
- Nachwuchs und Qualifizierung,
- Rahmenbedingungen.

Gibt es auf dem Markt alltagstaugliche Elektrofahrzeuge?

Bezogen auf reine Elektrofahrzeuge ist diese Frage eindeutig mit „Ja“ zu beantworten. Bereits seit der **Internationalen Automobil-Ausstellung 2013**, auf der BMW mit dem *i3*, VW mit dem *e-up* und *e-Golf* (2014) reine Elektrofahrzeuge präsentiert haben, gilt die Aussage, dass mittlerweile praktisch alle namhaften Automobilhersteller serientaugliche Elektrofahrzeuge mit steigender Modellvielfalt im Programm haben.

Die Alltagstauglichkeit solcher Fahrzeuge wurde seither durch zahlreiche Flottenversuche belegt und durch Serienfahrzeuge (z. B. dem *smart electric drive* und dem *Nissan Leaf*, bereits seit 2010 auf dem Markt) im täglichen Betrieb getestet.

Diese Fahrzeuge haben durchzugsstarke Motoren, sind wie herkömmliche Fahrzeuge hervorragend ausgestattet und erreichen inzwischen Reichweiten, die für die meisten Alltagsfahrten ausreichend sind.

Neben dem Angebot an reinen Elektrofahrzeugen gibt es ein steigendes Angebot an Plug-in-Hybriden, die sowohl mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor ausgestattet sind als auch mit Elektroantrieb und Akku. Mit diesen Fahrzeugen können Kurzstrecken bis typischerweise mehr als 50 km rein elektrisch gefahren werden. Für größere Reichweiten kommt dann der konventionelle Antrieb zum Einsatz. Insbesondere ab dem Jahr 2020 hat das Angebot an solchen Fahrzeugen mit stetig verbesserten Verbrauchs- und Reichweitendaten nochmals deutlich an Dynamik gewonnen.

Woher kommt der Strom für Elektrofahrzeuge?

Elektrofahrzeuge haben bezüglich dieser Frage einen grundsätzlichen Vorteil: Sie können im Prinzip an jeder Steckdose geladen werden und können damit auf eine vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Auch Strom ist derzeit ausreichend verfügbar. Überschlagsrechnungen zeigen, dass im Jahr 2021 der Stromverbrauch für etwa eine Million Elektrofahrzeuge (reine und Plug-in) auf deutschen Straßen weniger als 0,6% der Nettostromerzeugung in Deutschland betrug. Betrachtet man die von der Bundesregierung für das Jahr 2030 angestrebte Zahl von 15 Millionen Elektrofahrzeugen, so steigt der Anteil auf knapp 10% (bezogen auf die Stromerzeugung).

gung 2021). Wenn man zugrunde legt, dass der verwendete Strom regenerativ erzeugt werden soll, fordert dieser prognostizierte Bedarf deutlich verstärkte Anstrengungen für den weiteren Verlauf der Energiewende.

Gerade weil Elektrofahrzeuge dann besonders umweltfreundlich sind, wenn sie mit regenerativ erzeugtem Strom geladen werden, hat die Politik im *Nationalen Entwicklungsplan* die Kopplung der Elektromobilität an die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien festgeschrieben.

Welche Eigenschaften haben Elektrofahrzeuge und wie kommen sie beim Käufer an?

Die Eigenschaften der reinen E-Fahrzeuge, wie sie derzeit breit diskutiert werden und welche die Kaufentscheidungen der Kunden maßgeblich beeinflussen, lassen sich kompakt zusammenfassen:

Elektromobile sind leise, haben einen geringen Energieverbrauch und sind vor Ort emissionsfrei. Sie sind, selbst wenn man die zur Ladung notwendige Erzeugung des Stroms mit dem sogenannten „Strommix Deutschland“ berücksichtigt, umweltfreundlicher als herkömmliche Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Dem stehen aber zwei gravierende Nachteile entgegen: (Reine) Elektromobile haben eine geringe Reichweite. Kam bereits die erste Generation der Fahrzeuge (ab 2013) zwar im Realbetrieb schon auf Werte über 150 km, einem Bereich, der für die meisten Nutzer mehr als 90% der Tagesfahrten abdeckt. Gleichwohl bleiben die restlichen, längeren Fahrten, die mit dem Fahrzeug nur schwer zu realisieren sind. Deshalb wird eine Infrastruktur aufgebaut, die bei längeren Fahrten ein Zwischenladen an öffentlichen Stromladesäulen in vertretbarer Zeit ermöglichen soll. Die Fahrzeuge der Generation ab 2020 mildern den Reichweiten-Nachteil deutlich: Reichweiten von 300 km bis 500 km und darüber sind (je nach gewählter Akkukapazität) nicht mehr unüblich und Schnellladefähigkeit wird zunehmend zum Standard. Trotzdem bleibt für Fernfahrten der Nachteil, dass das Laden an einer Stromtankstelle deutlich länger dauert, als das konventionelle Tanken.

Ein weiterer Nachteil: Elektroautos sind teuer! Die Mehrkosten zum herkömmlichen Fahrzeug sind hauptsächlich durch den teuren Akku bedingt. Das ist auch mit geringen Betriebskosten schwer aufzufangen. Daher lief der Verkauf eher schleppend. In Deutschland (und vielen anderen Ländern) wird durch Kauf-/Umweltprämien auch dieser Nachteil deutlich verringert.

Wie entwickelt sich die Situation?

Nicht erst seit den letzten Jahren wird deutlich, dass dem Klimawandel auf allen Ebenen entgegengewirkt werden muss. Damit werden die CO₂-Emissionen der Verbrennermotoren zunehmend kritisch betrachtet und durch stetig strenger werdende Grenzwerte deutlich beschränkt. Die dadurch erforderlichen Anstrengun-

gen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes wird die Verbrennerfahrzeuge verteuern. Und der Druck auf die Automobilindustrie, den Anteil an (zumindest lokal) emissionsfreien Fahrzeugen zu erhöhen, wird wachsen. Gleichzeitig ist aber auch schon abzusehen, dass die Kosten für die teuren Akkus in den nächsten Jahren weiter deutlich sinken werden, sodass sich die Wirtschaftlichkeit zugunsten der E-Fahrzeuge verbessert.

Verbessern wird sich durch die technische Entwicklung weiterhin die Reichweite. Aber sie wird, soweit das heute abschätzbar ist, auch in den nächsten Jahren nicht in den Bereich heutiger Dieselaautos kommen. Diesbezüglich wird ein E-Fahrzeug ein herkömmliches Fahrzeug für große Strecken nicht ohne Weiteres ersetzen können. Aber es gibt inzwischen (und es wird mehr geben) auch Ansätze zu einem Verkehrssystem, wie man mit diesem Nachteil umgeht, ohne die Gesamtmobilität zu beeinträchtigen.

Was ist die Zielrichtung dieses Buchs?

Schon der erste Überblick dieses Kapitels zeigt, dass die Einführung der Elektromobilität eine komplexe Angelegenheit ist. In den folgenden Darstellungen werden die technischen Sachverhalte fundiert analysiert, Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit dieser Antriebe vorgestellt und Modellrechnungen/Simulationen durchgeführt. Weiter werden der Stand der Technik des Elektromobils erarbeitet und Grundlagen für realistische Kostenberechnungen erstellt.

Mit diesen Erkenntnissen kann ein Vergleich der zwei Systeme, Elektrofahrzeuge und Otto- bzw. Dieselfahrzeuge, sachgerecht durchgeführt werden. Damit lassen sich dann fundierte Aussagen treffen, mit welchen Verkehrskonzepten, welchen notwendigen Randbedingungen (einschließlich der Energieerzeugung) und ggf. mit welchen Fördermaßnahmen das E-Mobil einen sinnvollen und wirksamen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität liefern kann.

Das Buch kann somit als Sach-, aber auch als Lehrbuch für die Grundlagen der Elektromobilität genutzt werden.

2

Überblick Elektrofahrzeuge

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

■ 2.1 Geschichte und grundsätzliche Bedeutung

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

**Bild 2.1**

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

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

In den vergangenen Jahren wurden nun solche Akkus zu größeren Paketen zusammengepackt, sodass sie sowohl von der elektrischen Leistung als auch von der Kapazität für Kraftfahrzeuganwendungen geeignet sind. Eine der ersten, die diese Technik im Fahrzeugbereich zur Serienreife brachte, war die Firma TESLA. Diese baut anerkanntermaßen respektable Elektrofahrzeuge, obwohl die Firma bis dahin kein etablierter Fahrzeughersteller war. Das Modell, TESLA Model S, siehe Bild 2.2, beeindruckt mit Reichweiten von mehreren hundert Kilometern. Die dafür notwendigen Fahrzeugakkus mit entsprechend großer Kapazität bedingen aber einen entsprechend hohen Preis.

**Bild 2.2**

Tesla Model S.

Quelle: Tesla Motors

■ 2.2 Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug

Aus einem konventionellen Kraftfahrzeug wird ein Elektrofahrzeug, wenn der mechanische Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor durch einen Antriebsstrang mit Elektromotor ersetzt wird. Dabei gehen die Automobilfirmen in der Konstruktion der Elektrofahrzeuge unterschiedliche Wege: Beim **Purpose-Design** wird um diesen neuen Antriebsstrang ein eigenständig neues Fahrzeug entwickelt. Beispiele hierzu sind der *Nissan Leaf* oder der *BMW i3*, siehe Bild 2.3 und Bild 2.4.

**Bild 2.3**

Purpose-Design:

Nissan Leaf

**Bild 2.4**

BMW i3, Elektrofahrzeug mit innovativem Design. Quelle: BMW Group

Wird dagegen eine vorhandene Plattform als Basis für die Entwicklung genutzt, spricht man von **Conversion-Design**. Diesen Weg gingen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier wurden beim *smart electric drive*, der B-Klasse (siehe Bild 2.5), dem *e-up* und dem *e-Golf* jeweils vorhandene Plattformen genutzt. Damit sind in der Herstellung zwar entsprechende Synergien nutzbar, aber die konstruktiven Freiheiten werden deutlich eingeschränkt. Dennoch gibt es weiterhin ein wichtiges Argument für das Conversion-Design: Die genutzte Plattform ist so auch für die parallele Entwicklung und Fertigung entsprechender Plug-in-Hybride einfacher nutzbar.

**Bild 2.5**

Beispiel für Conversion-Design: Daimler B-Klasse Electric Drive

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

Neben dem angesprochenen Antriebsstrang mit Elektromotor muss noch der Energiespeicher ausgetauscht werden. Das heißt, der konventionelle Kraftstofftank wird ersetzt durch den Akku (Bild 2.6). Dieser nimmt zwar nicht wesentlich mehr Volumen ein, ist aber deutlich schwerer (Anhaltswert: etwa 350 kg Mehrgewicht bei 45 kWh Kapazität). Man nutzt dieses Gewicht, indem man den Akku im Fahrzeugboden anordnet und so für einen tieferen Schwerpunkt und damit mehr Fahrstabilität sorgt.

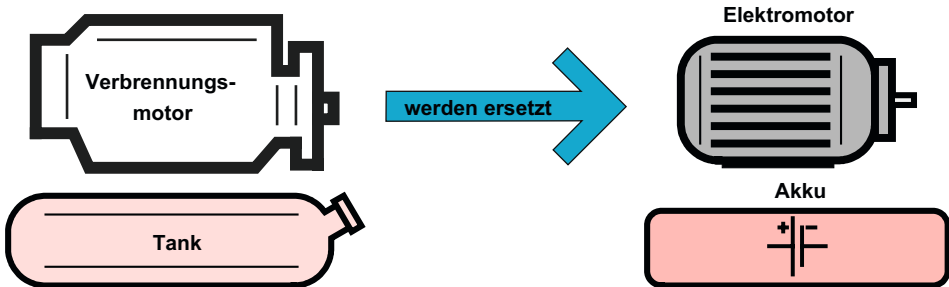


Bild 2.6 Beim Elektrofahrzeug wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt

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

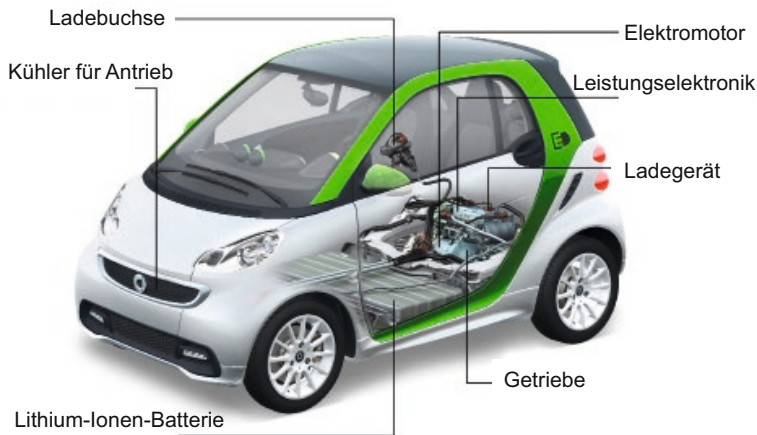


Bild 2.7 smart electric drive. Phantomgrafik mit dem im Unterboden eingebauten Li-Ionen-Akku. Quelle: Daimler AG

Index

Symbole

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

A

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

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

B

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

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

C

car2go 216
Carbon Footprint 176
Carsharing im ländlichen Raum 219
CATL 83
CCCV-Ladeverfahren (Constant Current,
Constant Voltage) 101
CCS-Ladedose 109
CCS-System 203
CHAdeMO-System 103, 109
Chamäleon Ladesystem 200
Charge-Depleting-mode 148
Charge Sustaining mode 148
Citaro Fuel-Cell-Hybrid 31
CO₂
– Ausstoß 15, 231
– Bilanz 176, 179
– Grenzwerte 16
– Reduktion 15
Coefficient of Performance 144
Combined Charging System (CCS) 103,
109
Combo-2-Stecker 109
Combo-System 106
Conversion-Design 9
Coulomb-Wirkungsgrad 99
Crashtests 82
cw-Wert 139

D

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

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

E

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

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

F

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

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

G

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

H

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

I

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

K

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

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

L

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

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

M

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

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

N

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

Nutzungsphase 176
Nutzungsverhalten 169

O

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

P

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

Q

Querschnittsfläche 139

R

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

S

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

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

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

U

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

V

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

Vorkonditionierung 143
Vor-Ort-Betrachtung 181

W

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

Z

Zellenherstellung 82
Zentralmotoren 60

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

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