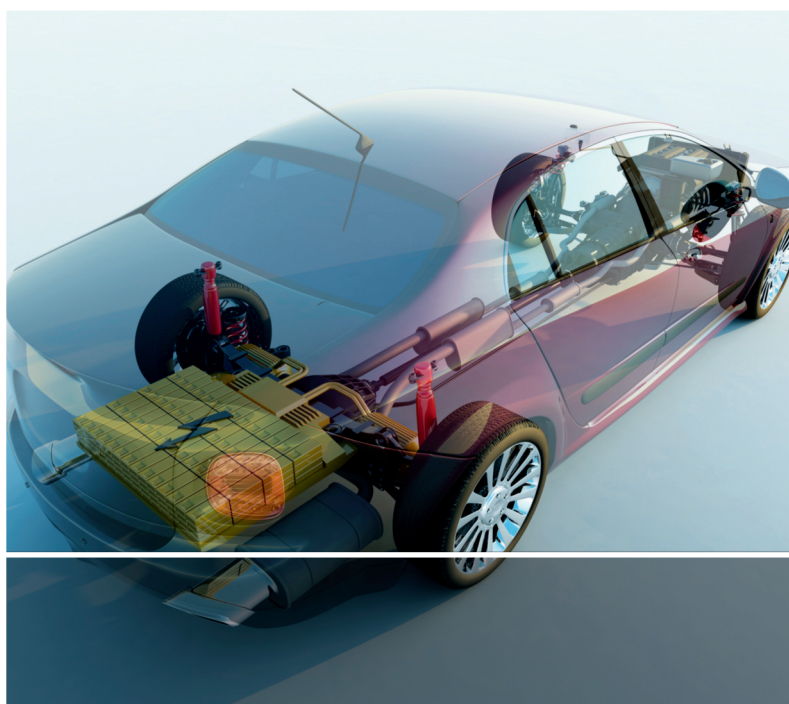


Anton Karle

# Elektromobilität

## Grundlagen und Praxis



HANSER



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

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

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Anton Karle

# Elektromobilität

Grundlagen und Praxis

Mit 139 Bildern und 21 Tabellen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

**Prof. Dr.-Ing. Anton Karle**  
Hochschule Furtwangen



Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und elektronischen Schaltungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN: 978-3-446-44339-6

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

# 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 CO<sub>2</sub>-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

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2</b> | <b>Überblick Elektrofahrzeuge .....</b>   | <b>17</b> |
|          | 2.1 Geschichte und grundsätzliche Bedeutung .....   | 17        |
|          | 2.2 Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und<br>herkömmlichem Kraftfahrzeug ..... | 18        |
|          | 2.3 Die Vorteile des Elektroantriebs .....  | 21        |
|          | 2.4 Die Nachteile des Elektroantriebs .....   | 23        |
|          | 2.5 Vorgaben zur CO <sub>2</sub> -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität .....          | 24        |
| <b>3</b> | <b>Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis ....</b>                               | <b>26</b> |
|          | 3.1 Elektro-Pkw .....   | 26        |
|          | 3.1.1 Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge .....                               | 26        |
|          | 3.1.2 Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended<br>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        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b>Grundlagen Kfz-Antriebe</b> .....   | <b>49</b> |
| 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<br>aus dem spezifischen Verbrauch ..... | 54        |
| 4.2.2.2  | Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen .....  | 55        |
| 4.2.2.3  | Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld                                     | 57        |
| <b>5</b> | <b>Elektrifizierter Antriebsstrang</b> .....   | <b>58</b> |
| 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 Elektrokräftfahrzeugen .....                           | 64        |
| 5.1.6    | Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der<br>Elektroantriebe .....                 | 66        |
| 5.1.7    | Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb .....                                 | 68        |
| 5.1.7.1  | Leistung des Antriebs und Leistung des<br>Gesamtfahrzeugs .....                        | 69        |
| 5.1.7.2  | Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und<br>Motordrehzahl .....                        | 70        |
| 5.1.7.3  | Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung .....                                   | 71        |
| 5.1.7.4  | Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem<br>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        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>Laden und Ladeinfrastruktur</b>                     | <b>88</b> |
| 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       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>7</b> | <b>Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen</b>  | <b>104</b> |
| 7.1      | Physikalische Grundlagen  | 104        |
| 7.1.1    | Berechnungsgrößen   | 104        |
| 7.1.2    | Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung                        | 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        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>8</b>  | <b>Strom für die Elektrofahrzeuge</b> .....   | <b>137</b> |
| 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        |
| <b>9</b>  | <b>Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen</b> .....                                       | <b>159</b> |
| 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 <sub>2</sub> -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des<br>Autoverkehrs ..... | 163        |
| 9.4       | Ökobilanz der Mercedes-Benz-B-Klasse Electric Drive .....                             | 165        |
| <b>10</b> | <b>Markt</b> .....  | <b>167</b> |
| 10.1      | Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge .....                         | 167        |
| 10.1.1    | Anzusetzende Kosten .....   | 167        |
| 10.1.2    | Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor-<br>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        |

---

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>11</b> | <b>Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen</b> .....             | <b>188</b> |
| 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        |
| <b>12</b> | <b>Förderung der Elektromobilität in Deutschland</b> .....        | <b>195</b> |
| 12.1      | Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte ..... | 195        |
| 12.2      | Schaufenster für Elektromobilität .....                           | 196        |
| 12.3      | NPE-Fortschrittsbericht 2014 .....                                | 197        |
| <b>13</b> | <b>Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung</b> .....             | <b>199</b> |
| <b>14</b> | <b>Workshop Simulation</b> .....                                  | <b>201</b> |
|           | <b>Glossar</b> .....  | <b>207</b> |
|           | <b>Verzeichnis Bildquellen</b> .....                              | <b>211</b> |
|           | <b>Literatur</b> .....  | <b>213</b> |
|           | <b>Index</b> .....  | <b>217</b> |



# 1

## Einführung

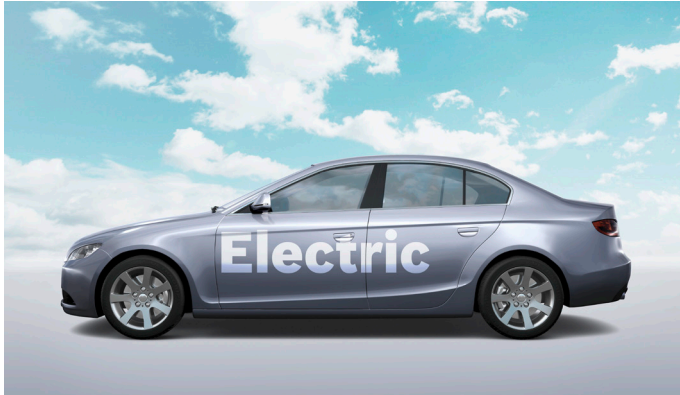
### Was ist Elektromobilität, was sind Elektrofahrzeuge?

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

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

**Tabelle 1.1** Typen von Elektrofahrzeugen

| Fahrzeugtyp  | Englische Bezeichnung                     | Beschreibung  |
|--|---|---|
| (Reines) Elektrofahrzeug   | Battery Electric Vehicle (BEV)            | Antrieb mit Elektromotor und mit am Netz aufladbarem Akku (Batterie)                                    |
| Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung<br>(= 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 beobachtet und analysiert die Entwicklungen im Bereich Elektromobilität. Daraus werden Empfehlungen abgeleitet, wie die Ziele des *Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität* erreicht werden können. Zusammengefasst werden die Erkenntnisse in Fortschrittsberichten an die Bundesregierung, zuletzt im Juni 2012 und im Dezember 2014.

Mitglieder sind etwa 20 hochrangige Experten, die in Arbeitsgruppen folgende wichtige Themen bearbeiten:

- Antriebstechnologie
- Batterietechnologie
- Ladeinfrastruktur und Netzintegration
- Normung, Standardisierung und Zertifizierung
- Materialien und Recycling

- Nachwuchs und Qualifizierung
- Rahmenbedingungen

### **Gibt es auf dem Markt alltagstaugliche Elektrofahrzeuge?**

Bezogen auf reine Elektrofahrzeuge ist diese Frage eindeutig mit „Ja“ zu beantworten.

Seit der **Internationalen Automobil-Ausstellung 2013**, auf der BMW mit dem *i3*, VW mit den *e-up* und dem für 2014 angekündigten *e-Golf* reine Elektrofahrzeuge präsentiert haben, gilt die Aussage, dass nahezu alle namhaften Automobilhersteller serientaugliche Elektrofahrzeuge im Programm haben.

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

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

Neben dem Angebot an reinen Elektrofahrzeugen gibt es ein steigendes Angebot an sogenannten Plug-In-Hybriden, die sowohl mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor ausgestattet sind als auch mit Elektroantrieb und Akku. Mit diesen Fahrzeugen können Kurzstrecken bis typischerweise 50 km rein elektrisch gefahren werden. Für größere Reichweiten kommt dann der konventionelle Antrieb zum Einsatz.

### **Woher kommt der Strom für Elektrofahrzeuge?**

Elektrofahrzeuge haben bezüglich dieser Frage einen grundsätzlichen Vorteil: Sie können im Prinzip an jeder Steckdose geladen werden und können damit auf eine vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Auch Strom ist ausreichend verfügbar. Die von der Bundesregierung angestrebten 1 Million Elektrofahrzeuge, die 2020 auf deutschen Straßen fahren sollen, benötigen nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt nur 0,3 % des derzeitigen deutschen Strombedarfs. Das entspricht weniger als der Hälfte des derzeitigen (2014) jährlichen Zuwachses an regenerativem Strom.

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

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

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

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



Dem stehen aber zwei gravierende Nachteile entgegen: (Reine) Elektromobile haben eine geringe Reichweite. Zwar kommen sie derzeit schon auf Werte um die 150 km, ein Bereich, der für die meisten Nutzer mehr als 90 % der Tagesfahrten abdeckt.

Gleichwohl bleiben die restlichen, längeren Fahrten, die mit dem Fahrzeug nur schwer zu realisieren sind. Deshalb wird derzeit eine Infrastruktur aufgebaut, die bei längeren Fahrten ein Zwischenladen an öffentlichen Stromladesäulen in vertretbarer Zeit ermöglichen soll.

Ein weiterer Nachteil: Elektroautos sind teuer! Die Mehrkosten – im Jahr 2014 mehr als 10 000 Euro im Vergleich zum herkömmlichen Fahrzeug – sind hauptsächlich durch den teuren Akku bedingt. Das ist auch mit geringen Betriebskosten schwer aufzufangen. Daher läuft der Verkauf noch eher schleppend.

### **Wie wird sich die Situation weiterentwickeln?**

Es gibt viele Untersuchungen, die vorhersagen, dass die Begrenztheit des Erdölangebots drastisch zunehmen wird. Wenn in Ländern wie Indien und China die Motorisierung ansteigt, wie es heute ja schon zu beobachten ist, wird dies neben einem steigenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu einer weiteren Verknappung der Ressourcen führen. Und somit zu steigenden Benzinpreisen. Gleichzeitig ist heute aber auch schon abzusehen, dass die Kosten für die teuren Akkus in den nächsten Jahren deutlich sinken werden, so dass sich die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen zu Gunsten des E-Mobils verbessert.

Verbessern wird sich durch die weitere technische Entwicklung auch die Reichweite. Aber sie wird, soweit das heute abschätzbar ist, auch in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten nicht in den Bereich heutiger Benzin- oder Dieselaautos kommen.

Diesbezüglich wird ein E-Fahrzeug ein herkömmliches Fahrzeug nicht ersetzen können. Aber es gibt inzwischen (und es wird mehr geben) viele Ansätze zu einem Verkehrssystem, wie man mit diesem Nachteil umgeht, ohne die Gesamtmobilität zu beeinträchtigen.

### **Was ist die Zielrichtung dieses Buchs?**

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

Mit diesen Grundlagen kann ein Vergleich der zwei Systeme, Elektrofahrzeuge und Otto- bzw. Dieselfahrzeuge, sachgerecht durchgeführt werden.

Auf dieser Basis lassen sich dann fundierte Aussagen treffen, mit welchen Verkehrskonzepten, welchen notwendigen Randbedingungen (einschließlich der Energieerzeugung) und ggf. mit welchen Fördermaßnahmen das E-Mobil einen sinnvollen und wirksamen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität liefern kann.

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

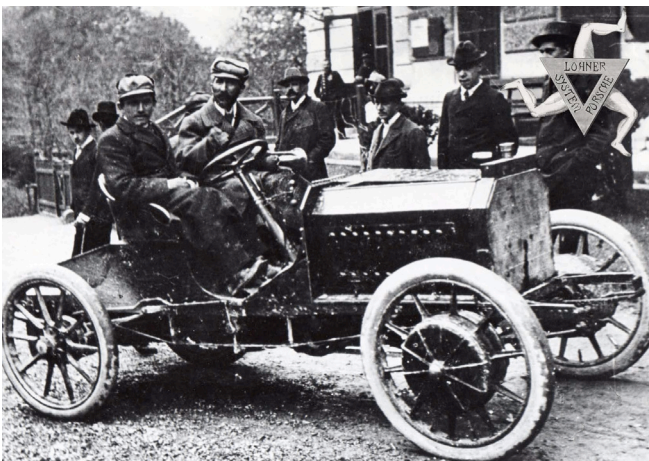
# 2

## 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.



**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.

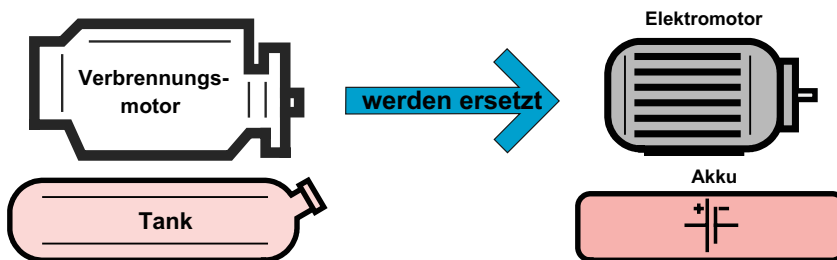
Wird dagegen eine vorhandene Plattform als Basis für die Entwicklung genutzt, spricht man von **Conversion Design**. Diesen Weg gehen beispielsweise Daimler Benz und VW. Hier werden beim *smart electric drive*, der B-Klasse, (siehe Bild 2.5), dem *e-up* und dem *e-Golf* jeweils vorhandene Plattformen 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

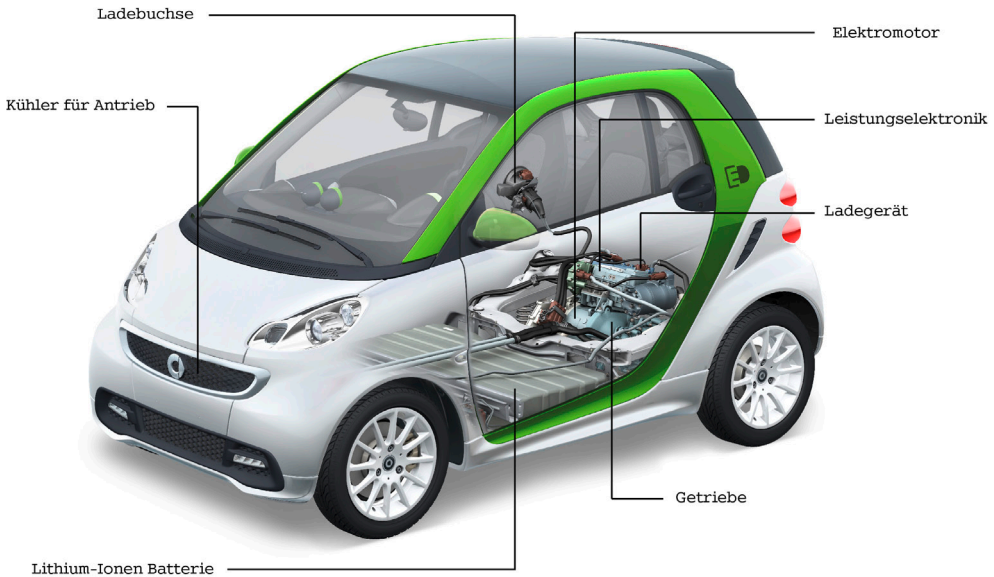
Langfristig allerdings, bei großen Stückzahlen, hat das Purpose-System Vorteile, bietet doch die Elektrifizierung eine Menge neuer Freiheitsgrade, die zur Optimierung des Gesamtfahrzeuges genutzt werden können.

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 CO<sub>2</sub>-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 angenehmen 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.