
Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr

Mathias Bertram • Stefan Bongard

Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr

Grundlagen, Einflussfaktoren
und Wirtschaftlichkeitsvergleich

Mathias Bertram
Bietigheim-Bissingen, Deutschland

Stefan Bongard
Hochschule Ludwigshafen am Rhein
Deutschland

ISBN 978-3-658-02263-1
DOI 10.1007/978-3-658-02264-8

ISBN 978-3-658-02264-8 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich | Annette Prenzer

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | V |
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | XIV |
| Tabellenverzeichnis | XVI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 2 |
| 1.2 Aufbau und Vorgehensweise..... | 3 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 Definition und Abgrenzung zentraler Begriffe des motorisierten Individualverkehrs | 5 |
| 2.2 Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Motorisierungsgrad..... | 10 |
| 2.3 Pkw-Bestand und Neuzulassungen..... | 18 |
| 2.4 Energiebedarf und CO ₂ -Emissionen des Verkehrssektors..... | 25 |
| 2.5 Elektrifizierte Antriebskonzepte | 30 |
| 2.5.1 Mild-Hybrid und Voll-Hybrid (MHEV/FHEV) | 30 |
| 2.5.2 Plug-in-Hybrid (PHEV)..... | 32 |
| 2.5.3 Elektrofahrzeuge mit Range Extender (REEV/EREV)..... | 33 |
| 2.5.4 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)..... | 34 |
| 2.5.5 Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle (FCEV)..... | 36 |
| 3 Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Elektromobilität | 38 |
| 3.1 Energiepolitische Einflussfaktoren..... | 38 |
| 3.1.1 Der weltweite Energiebedarf..... | 38 |
| 3.1.2 Die Ressource Erdöl..... | 41 |
| 3.1.3 Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Elektrofahrzeuge als Stromspeicher..... | 49 |
| 3.2 Umwelt-, verkehrs- und steuerpolitische Einflussfaktoren..... | 54 |
| 3.2.1 Verordnung zur Minderung der CO ₂ -Emissionen von Pkw in der EU . | 54 |
| 3.2.2 Regierungsprogramm Elektromobilität..... | 74 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.3 | Subventionen und Fördermaßnahmen im internationalen Vergleich .. | 86 |
| 3.2.4 | Umweltbilanz und Emissionsvermeidungskosten der Elektromobilität | 92 |
| 3.3 | Technische und infrastrukturelle Einflussfaktoren..... | 96 |
| 3.3.1 | Nationale Plattform Elektromobilität (NPE)..... | 97 |
| 3.3.2 | Zell- und Akkutechnik..... | 100 |
| 3.3.3 | Fahrzeugtechnik, Standardisierung und Patente..... | 105 |
| 3.3.4 | Intelligentes Stromnetz und Ladeinfrastruktur | 108 |
| 4 | Fallstudien | 115 |
| 4.1 | Technische Annahmen..... | 117 |
| 4.1.1 | Benziner | 117 |
| 4.1.2 | Elektroauto | 120 |
| 4.2 | Kostenannahmen | 123 |
| 4.2.1 | Benziner | 124 |
| 4.2.2 | Elektroauto | 129 |
| 4.2.3 | Öffentlicher Personenverkehr | 135 |
| 4.3 | Fall 1 | 138 |
| 4.3.1 | Szenario Benziner | 139 |
| 4.3.2 | Szenario Elektroauto..... | 140 |
| 4.3.3 | Vergleich der Szenarien Benziner und Elektroauto | 143 |
| 4.4 | Fall 2 | 144 |
| 4.5 | Fall 3 | 145 |
| 4.6 | Kritische Würdigung der Ergebnisse | 146 |
| 5 | Bewertungsschema für den Alternativenvergleich..... | 148 |
| 5.1 | Kriteriensammlung | 149 |
| 5.2 | Scoring-Modell | 158 |
| 6 | Ausblick und Zusammenfassung | 164 |
| | Quellenverzeichnis | 166 |
| | Anhangverzeichnis | 221 |
| | Sachwortverzeichnis | 226 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|---|
| ACEA | Association des Constructeurs Européens d'Automobiles |
| AG | Aktiengesellschaft |
| AmtshilfeRLUmsG | Amtshilferichtlinie-Umsetzungsgesetz |
| ARRA | American Recovery and Reinvestment Act |
| Art. | Artikel |
| AU | Abgasuntersuchung |
| BAFU | Bundesamt für Umwelt |
| BCG | Boston Consulting Group |
| BDI | Bundesverband der Deutschen Industrie |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BGR | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe |
| BImSchV | Bundes-Immissionsschutzverordnung |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMF | Bundesministerium der Finanzen |
| BMJ | Bundesministerium der Justiz |
| BMT | Blue Motion Technology |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit |
| BMVBS | Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung |
| BMW | Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie |
| BOE | Barrel Öläquivalent |

| | |
|-----------------|--|
| BP | Beyond Petroleum (früher: British Petroleum) |
| bpb | Bundeszentrale für politische Bildung |
| bspw. | beispielsweise |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| DAT | Deutsche Automobil Treuhand GmbH |
| DB | Deutsche Bahn AG |
| DIW | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin |
| DSGF | Daseinsgrundfunktionen |
| DSM | Demand Side Management |
| EEA | European Environment Agency |
| EEG | Erneuerbare Energien Gesetz |
| EEV | Endenergieverbrauch |
| EIA | U.S. Energy Information Administration |
| eLCAR | Electric Car Life Cycle Analysis |
| engl. | englisch |
| E.ON | Energiekonzern E.ON Societas Europaea ¹ |
| EREV | Extended-Range Electric Vehicle |
| EU | Europäische Union |
| e. V. | eingetragener Verein |
| EVI | Electric Vehicle Index |

¹ Bedeutung siehe E.ON SE (Hrsg.) (i2013).

| | |
|-------|---|
| EVS | Einkommens- und Verbrauchsstichprobe |
| EWI | Energiewirtschaftliches Institut Köln |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle |
| F&E | Forschung und Entwicklung |
| FHEV | Full Hybrid Electric Vehicle |
| FOM | (Fach-) Hochschule für Ökonomie und Management |
| fp | Primärenergiefaktor |
| FZ | Fahrzeugzulassungen |
| Fzg. | Fahrzeug |
| GGEMO | Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| GUS | Gemeinschaft unabhängiger Staaten |
| GW | Gigawatt |
| GWh | Gigawattstunden |
| GWS | Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH |
| GWV | Geldwerter Vorteil |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle |
| Hrsg. | Herausgeber |
| HU | Hauptuntersuchung |
| HVV | Hamburger Verkehrsverbund GmbH |
| IAA | Internationale Automobil-Ausstellung |
| IAO | Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation |

| | |
|----------|--|
| IEA | Internationale Energieagentur (der OECD) |
| IER | Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart |
| ifeu | Institut für Energie und Umweltforschung |
| ifmo | Institut für Mobilitätsforschung |
| IIRM | Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement der Universität Leipzig |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnologie |
| i-MiEV | Mitsubishi innovative Electric Vehicle |
| Inc. | Incorporated |
| inkl. | inklusive |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISI | Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung |
| IT | Informationstechnik |
| IV | Individualverkehr |
| IVS | Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig |
| JStG | Jahressteuergesetz |
| KBA | Kraftfahrt-Bundesamt |
| Kfz | Kraftfahrzeug |
| km | Kilometer |
| KraftStG | Kraftfahrzeugsteuergesetz |
| kW | Kilowatt |
| kWh | Kilowattstunde |

| | |
|-------|--|
| LED | Leuchtdiode (engl. Light-Emitting Diode) |
| MHEV | Mild Hybrid Electric Vehicle |
| MiD | Mobilität in Deutschland |
| Mio. | Million |
| MIV | Motorisierter Individualverkehr |
| Mrd. | Milliarde |
| NCA | Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Batterie |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzyklus |
| n. F. | neue Fassung |
| NMIV | Nicht-motorisierter Individualverkehr |
| NPE | Nationale Plattform Elektromobilität |
| Nr. | Nummer |
| OEM | Original Equipment Manufacturer |
| oHG | offene Handelsgesellschaft |
| o. J. | ohne Jahr |
| OPEC | Organisation erdölexportierender Länder |
| ÖPFV | Öffentlicher Personenfernverkehr |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| ÖPV | Öffentlicher Personenverkehr |
| o. S. | ohne Seite |
| ÖSPV | Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr |
| o. V. | ohne Verfasser |
| OWL | Ostwestfalen-Lippe |

| | |
|-------|---|
| PEV | Primärenergieverbrauch |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| PIK | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung |
| Pkm | Personenkilometer |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PS | Pferdestärke |
| PSW | Pumpspeicherkraftwerk |
| RE | Erneuerbare Energien |
| REEV | Range Extended Electric Vehicle |
| R+V | Volks-und Raiffeisenbanken Versicherung AG |
| RWE | Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG |
| RWI | Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung |
| S. | Seite |
| SPNV | Öffentlicher Schienenpersonennahverkehr |
| StVG | Straßenverkehrsgesetz |
| SUV | Sport Utility Vehicle |
| THG | Treibhausgas |
| TtW | Tank-to-Wheel |
| TÜV | Technischer Überwachungsverein |
| TWh | Terawattstunde |
| U. S. | Vereinigten Staaten |
| USA | Vereinigten Staaten von Amerika |
| v. a. | vor allem |

| | |
|---------|--|
| VDA | Verband der Automobilindustrie |
| VDE | Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e. V. |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VDV | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen |
| Vgl. | Vergleich |
| VPI | Verbraucherpreis-Index |
| VU | Verkehrsunternehmen |
| WV-StVO | Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung |
| vzbv | Verbraucherzentrale Bundesverband e. V. |
| WEO | World Energy Outlooks |
| WtT | Well-to-Tank |
| WtW | Well-to-Wheel |
| WWF | World Wide Fund for Nature |
| z. B. | zum Beispiel |
| ZEW | Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Verkehrsarten des Personenverkehrs..... | 7 |
| Abbildung 2-2: Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung nach Verkehrsart 2003 und 2025 | 12 |
| Abbildung 2-3: Verteilung der Tagesfahrleistung mobiler Pkw privater Halter (Mo-So) im Jahr 2002..... | 15 |
| Abbildung 2-4: Motorisierungsgrad nach Geschlecht und Altersgruppen bis 2020 .. | 17 |
| Abbildung 2-5: Pkw-Bestand gesamt in Deutschland (stichtagsbezogen jeweils auf den 31.12.) | 19 |
| Abbildung 2-6: Anteil der Elektrofahrzeuge an den gesamten Pkw-Neuzulassungen 2005-2020 | 25 |
| Abbildung 2-7: CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2008 | 26 |
| Abbildung 2-8: Entwicklung der durchschnittlichen spezifischen CO ₂ -Emissionen Pkw-Bestand/-Neuzulassungen in Deutschland von 1990-2020 | 28 |
| Abbildung 2-9: Toyota Prius III | 32 |
| Abbildung 2-10: Toyota Prius Plug-in-Hybrid..... | 33 |
| Abbildung 2-11: Opel Ampera | 34 |
| Abbildung 2-12: Mitsubishi i-MiEV | 36 |
| Abbildung 3-1: Energieverbrauch weltweit – Anteil der Energieträger am Verbrauch in den Regionen 2010 | 39 |
| Abbildung 3-2: Weltweiter Primärenergieverbrauch nach Regionen 1965-2035 | 40 |
| Abbildung 3-3: Peak Oil – prognostizierte Förderverläufe für konventionelles Erdöl | 44 |
| Abbildung 3-4: Weltweites Gesamtpotenzial von konventionellem Erdöl sowie Ölsanden, Schweröl und Ölschiefer 2007 | 45 |
| Abbildung 3-5: Weltweiter Erdölpreis von 1955 bis 2011 nominal (US-Dollar/Barrel) und inflationsbereinigt (US-Dollar ₂₀₀₉ /Barrel) sowie Prognose für 2009 bis 2035 in drei Szenarien (US-Dollar ₂₀₀₉ /Barrel) | 47 |
| Abbildung 3-6: Verteilung des Gesamtpotenzials von konventionellem Erdöl 2007 nach Regionen | 49 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 3-7: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren und Zielen gemäß Kyoto-Protokoll und Energiekonzept 2050..... | 50 |
| Abbildung 3-8: Grundsystematik der CO ₂ -Reduktion..... | 57 |
| Abbildung 3-9: Gewichtsbasierter CO ₂ -Grenzwert der EU für neue Pkws ab 2015.. | 62 |
| Abbildung 3-10: CO ₂ -Lastenverteilung für neue PKW in der EU im Zeitraum von 2006-2015 | 64 |
| Abbildung 3-11: Auswirkungen des Flotten-Phase-ins auf die CO ₂ -Emissions-Zielerfüllung..... | 67 |
| Abbildung 3-12: Strafzahlung bei Emissionsüberschreitung je Neuwagen (ab 2012) | 69 |
| Abbildung 3-13: Gültige Regelung und Vorschlag der EU zu Super Credits (2012-2023)..... | 71 |
| Abbildung 3-14: Vergleich der Klimawirkung durch die Produktion und die Nutzung eines konventionell- und batteriebetriebenen Kompaktklasse-Pkw in den Jahren 2010 und 2030 (Laufleistung: 150.000 km)..... | 93 |
| Abbildung 3-15: THG-Emissionen und Energieverbrauch Well-to-Wheel (WtW) verschiedener Antriebstechnologien und Energiequellen..... | 95 |
| Abbildung 3-16: Heutige CO ₂ -Vermeidungskosten in den Sektoren Haushalt, Energie und Verkehr..... | 96 |
| Abbildung 4-1: Anteilige Ausgaben der privaten Haushalte für Verkehr und Mobilität 2005..... | 115 |
| Abbildung 4-2: Kraftstoffpreisentwicklung 1990–2020 | 127 |
| Abbildung 4-3: Strompreisentwicklung 1990-2020 (Haushaltskunden)..... | 133 |
| Abbildung 4-4: Fahrpreisentwicklung 1990-2020..... | 137 |
| Abbildung 5-1: Musterschema des Scoring-Modells | 159 |
| Abbildung 5-2: Anwendungsbeispiel 1 für das Scoring-Modell | 161 |
| Abbildung 5-3: Anwendungsbeispiel 2 für das Scoring-Modell | 163 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 2-1: | Elektrisch angetriebene Verkehrsmittel nach Verkehrsart und Verkehrsträger..... | 9 |
| Tabelle 2-2: | Abgrenzungskriterien für Elektrofahrzeuge..... | 10 |
| Tabelle 2-3: | Marktanteile und Emissionswerte zur Erreichung des CO ₂ -Zielwerts von 95 g/km bis 2020 | 30 |
| Tabelle 3-1: | Ziele und Entwicklungspfade des Energiekonzepts der Bundesregierung vom 28. September 2010..... | 51 |
| Tabelle 3-2: | Strombedarf von Elektrofahrzeugen und Vergleichswerte | 53 |
| Tabelle 3-3: | Beispiele für Öko-Innovationen..... | 58 |
| Tabelle 3-4: | Kriterien für Öko-Innovationen | 59 |
| Tabelle 3-5: | Zusätzliche Maßnahmen zur Minderung der CO ₂ -Emissionen | 60 |
| Tabelle 3-6: | Formel zur Berechnung des herstellereigenen CO ₂ -Grenzwerts..... | 63 |
| Tabelle 3-7: | CO ₂ -Emissionen und CO ₂ -Zielwert der Emissionsgemeinschaft VW Gruppe (in 2011)..... | 66 |
| Tabelle 3-8: | Anreize und Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität im Rahmen des Regierungsprogramms Elektromobilität | 76 |
| Tabelle 3-9: | Electric Vehicle Index (EVI) – zwei Dimensionen (McKinsey) | 90 |
| Tabelle 3-10: | Index Elektromobilität – drei Indikatoren (Roland Berger) | 91 |
| Tabelle 3-11: | Übersicht – Leuchttürme, Themencluster und vorgeschlagene Budgets | 99 |
| Tabelle 3-12: | Vergleich der Kraftstoffe nach Energiedichte und Nutzenergie | 102 |
| Tabelle 4-1: | Aufpreisbereitschaft beim Kauf eines Elektroautos | 116 |
| Tabelle 4-2: | Technische Daten des Referenzfahrzeugs (Benziner)..... | 119 |
| Tabelle 4-3: | Technische Daten des Referenzfahrzeugs (Elektroauto)..... | 123 |
| Tabelle 4-4: | Anschaffungskosten für das Referenzfahrzeug 2011 und 2020 (Benziner)..... | 125 |
| Tabelle 4-5: | Jährliche Unterhaltskosten für das Referenzfahrzeug 2011 und 2020 (Benziner)..... | 129 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 4-6: | Anschaffungskosten für das Referenzfahrzeug 2011 und 2020 (Elektroauto) | 131 |
| Tabelle 4-7: | Jährliche Unterhaltskosten für das Referenzfahrzeug 2011 und 2020 (Elektroauto) | 135 |
| Tabelle 4-8: | Fall 1/Szenario Benziner – jährliche Fahrleistung und variable Kosten des Pkw 2011 und 2020 | 139 |
| Tabelle 4-9: | Fall 1/Szenario Benziner – jährliche Unterhaltskosten des Pkw 2011 und 2020 | 140 |
| Tabelle 4-10: | Fall 1/Szenario Elektroauto – jährliche Fahrleistung und variable Kosten E-Pkw 2011 und 2020 | 140 |
| Tabelle 4-11: | Fall 1/Szenario Elektroauto – jährliche Unterhaltskosten des E-Pkw 2011 und 2020 | 141 |
| Tabelle 4-12: | Fall 1/Szenario Elektroauto – jährliche Fahrtkosten ÖPV 2011 und 2020 | 142 |
| Tabelle 4-13: | Fall 1/Szenario Elektroauto – jährliche Kosten Mietwagen 2011 und 2020 | 142 |
| Tabelle 4-14: | Fall 1/Szenario Elektroauto – jährliche Gesamtkosten 2011 und 2020 | 143 |
| Tabelle 4-15: | Fall 1/Vergleich der Szenarien Benziner und Elektroauto – jährliche Gesamtkosten 2011 und 2020 | 144 |
| Tabelle 4-16: | Fall 2/Vergleich der Szenarien Benziner und Elektroauto – jährliche Gesamtkosten 2011 und 2020 | 144 |
| Tabelle 4-17: | Fall 3/Vergleich der Szenarien Benziner und Elektroauto – Amortisationslaufleistung 2011 und 2020 (Elektroauto gegenüber Benziner) | 146 |
| Tabelle 5-1: | Vier Lebenszyklusphasen eines Pkws | 150 |
| Tabelle 5-2: | Oberkriterien der Kriteriensammlung | 151 |
| Tabelle 5-3: | Struktur der Kriteriensammlung | 151 |
| Tabelle 5-4: | Kriterienkatalog | 157 |