

## Marktpotenziale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität

### Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen

Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von  
Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität  
des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit

#### **Autoren:**

Florian Hacker

Ralph Harthan

Peter Kasten

Charlotte Loreck

Dr. Wiebke Zimmer

**Berlin, Oktober 2011**

#### **Öko-Institut e.V.**

##### **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 17 71

79017 Freiburg, Deutschland

##### **Hausadresse**

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg, Deutschland

**Tel.** +49 (0) 761 - 4 52 95-0

**Fax** +49 (0) 761 - 4 52 95-88

##### **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt, Deutschland

**Tel.** +49 (0) 6151 - 81 91-0

**Fax** +49 (0) 6151 - 81 91-33

##### **Büro Berlin**

Schicklerstraße 5-7

10179 Berlin, Deutschland

**Tel.** +49 (0) 30 - 40 50 85-0

**Fax** +49 (0) 30 - 40 50 85-388

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen 16EMO031 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

## Inhaltsverzeichnis

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Einleitung und Hintergrund zum Forschungsvorhaben .....</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1       | Ziel des Forschungsvorhabens .....                              | 8         |
| 1.2       | Konzeption des Forschungsvorhabens .....                        | 10        |
| <b>2.</b> | <b>Szenarioprozess .....</b>                                    | <b>14</b> |
| 2.1       | Stakeholder-Dialog & Experten-Workshop .....                    | 14        |
| 2.2       | Szenarioannahmen .....  | 15        |
| 2.2.1     | Fahrzeugtechnik & -kosten .....                                 | 16        |
| 2.2.2     | Ladeinfrastruktur .....   | 17        |
| 2.2.3     | Energiepreisentwicklung .....                                   | 18        |
| 2.2.4     | Mobilitätsverhalten .....                                       | 18        |
| 2.2.5     | Modellansatz .....  | 19        |
| <b>3.</b> | <b>Marktentwicklung Elektromobilität .....</b>                  | <b>20</b> |
| 3.1       | Maximalpotenzial Elektromobilität .....                         | 20        |
| 3.1.1     | Datengrundlage .....  | 21        |
| 3.1.2     | Modellansatz .....  | 21        |
| 3.1.3     | Datenaufbereitung .....   | 22        |
| 3.1.4     | Methodisches Vorgehen .....                                     | 27        |
| 3.1.5     | Bestimmung des Maximalpotenzials .....                          | 30        |
| 3.1.6     | Sensitivitätsanalyse .....                                      | 32        |
| 3.2       | Akzeptanzbetrachtung .....                                      | 34        |
| 3.3       | Marktpotenzial Elektromobilität .....                           | 35        |
| 3.3.1     | Methodisches Vorgehen .....                                     | 35        |
| 3.3.2     | Bestimmung des Marktpotenzials .....                            | 36        |
| 3.4       | Technologiediffusion & Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen ..... | 37        |
| 3.4.1     | Technologiediffusion .....                                      | 37        |
| 3.4.2     | Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen .....                        | 40        |
| <b>4.</b> | <b>Entwicklung Pkw-Bestand und Fahrleistung .....</b>           | <b>43</b> |
| 4.1       | Bestandsmodell .....  | 43        |
| 4.2       | Bestandsentwicklung Elektromobilität .....                      | 46        |
| 4.3       | Entwicklung der elektrischen Fahrleistung .....                 | 48        |
| <b>5.</b> | <b>Fahrzeugnutzungsprofile Elektromobilität .....</b>           | <b>51</b> |
| 5.1       | Vorgehen / Datengrundlage .....                                 | 51        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>5.2</b> | <b>Typische Fahrzeugnutzung im Alltag.....</b>  | <b>53</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Integration von Nutzungsprofilen elektrischer Fahrzeuge in die Strommarktmodellierung.....</b>                   | <b>58</b> |
| <b>6.</b>  | <b>Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor .</b>  | <b>61</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Motivation .....</b>   | <b>61</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Kraftwerkseinsatz am Strommarkt .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Methodisches Vorgehen .....</b>  | <b>62</b> |
| 6.3.1      | Grundsätzliche Beschreibung .....   | 62        |
| 6.3.2      | Das Strommarktmodell PowerFlex - Modellbeschreibung.....  | 63        |
| 6.3.3      | Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex .....  | 64        |
| <b>6.4</b> | <b>Szenarioannahmen .....</b>   | <b>67</b> |
| 6.4.1      | Szenariodefinition .....  | 67        |
| 6.4.2      | Kraftwerkspark .....  | 68        |
| 6.4.3      | Kosten für Brennstoffe, Importstrom und CO <sub>2</sub> -Preise .....   | 71        |
| 6.4.4      | CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren .....  | 71        |
| 6.4.5      | Stromnachfrage .....  | 72        |
| 6.4.6      | Elektrofahrzeuge .....  | 72        |
| <b>6.5</b> | <b>Ergebnisse .....</b>   | <b>73</b> |
| 6.5.1      | Kraftwerkseinsatz in stundenscharfer Darstellung .....  | 73        |
| 6.5.2      | Brennstoffmix und spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung für Elektromobilität..... | 77        |
|            | Szenario „mit Elektromobilität“ – Darstellung der Ergebnisse.....   | 77        |
|            | Szenario „mit Elektromobilität“ – Diskussion der Ergebnisse.....  | 81        |
|            | Szenarien „Elektromobilität und zusätzliche erneuerbare Energien“ - Darstellung der Ergebnisse.....                 | 83        |
|            | Szenarien „Elektromobilität und zusätzliche erneuerbare Energien“ - Diskussion der Ergebnisse.....                  | 84        |
| 6.5.3      | Beitrag der Elektromobilität zur Integration der erneuerbaren Energien .....  | 85        |
| <b>7.</b>  | <b>CO<sub>2</sub>-Bilanz Elektromobilität .....</b>   | <b>88</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Hintergrund.....</b>   | <b>88</b> |
| <b>7.2</b> | <b>Vorgehen und Rahmenbedingungen.....</b>  | <b>88</b> |
|            | Fahrleistung.....   | 89        |
|            | Spezifischer Energieverbrauch.....  | 89        |
|            | CO <sub>2</sub> -Intensität der Kraftstoffe.....  | 90        |
| <b>7.3</b> | <b>CO<sub>2</sub>-Bilanz auf Fahrzeugebene .....</b>  | <b>92</b> |
| <b>7.4</b> | <b>CO<sub>2</sub>-Bilanz im Kontext des deutschen Pkw-Bestands.....</b>   | <b>96</b> |
|            | Entwicklung des Endenergiebedarf.....   | 96        |

|     |   |            |
|-----|---|------------|
|     | Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen.....  | 97         |
| 7.5 | <b>Exkurs: Mögliche Wechselwirkung zwischen Elektromobilität und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw.....</b>                                | <b>99</b>  |
| 8.  | <b>Zusammenfassung.....</b>   | <b>103</b> |
| 9.  | <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>108</b> |
|     | Anhang A: Szenarioannahmen .....  | 110        |
|     | Anhang B: Fahrzeugnutzungsprofile.....  | 113        |
|     | Anhang C: Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen, CO <sub>2</sub> -Emissionen, CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren und Anteil erneuerbarer Energien ... | 114        |

## Abbildungsverzeichnis

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1:  | Modellkonzept OPTUM .....  | 10 |
| Abbildung 2:  | Schema zum Vorgehen bei Maximalpotenzialbestimmung .....   | 22 |
| Abbildung 3:  | Schematische Darstellung zum Vorgehen der Datenaufbereitung der MiD 2008 für die Maximalpotenzialabschätzung und zur Ableitung von Fahrzeugnutzungsprofilen.....                 | 23 |
| Abbildung 4:  | Maximalpotenzial für elektrische Pkw im Jahr 2030 - differenziert nach Größenklassen.....  | 31 |
| Abbildung 5:  | Maximalpotenzial für elektrische Fahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030 .   | 32 |
| Abbildung 6:  | Sensitivitätsbetrachtung des Maximalpotenzials batterieelektrischer Pkw.....   | 34 |
| Abbildung 7:  | Marktpotenzial elektrischer Fahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030 (SP: Stellplatz) .....   | 37 |
| Abbildung 8:  | Reale Marktentwicklung von Beispieltechnologien und deren Simulation nach Gompertz, Quelle: [9].....   | 38 |
| Abbildung 9:  | Technologiediffusionskurve nach Gompertz (Referenz: Marktentwicklung Hybrid-Pkw in den USA) .....  | 39 |
| Abbildung 10: | Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen an batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Pkw in Deutschland.....   | 41 |
| Abbildung 11: | Bestandszugehörigkeit x Jahre nach der Zulassung .....   | 44 |
| Abbildung 12: | Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen .....  | 47 |
| Abbildung 13: | Durch Elektrofahrzeuge substituierte konventionelle Pkw .....  | 48 |
| Abbildung 14: | Entwicklung der Pkw-Fahrleistung im Szenario Elektromobilität .....  | 49 |
| Abbildung 15: | Veränderung der Fahrleistung (differenziert nach Antriebstyp und Energieträger) zwischen einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge und dem Szenario Elektromobilität ..... | 50 |
| Abbildung 16: | Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Werktag .....   | 55 |
| Abbildung 17: | Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Samstag.....  | 56 |
| Abbildung 18: | Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Sonntag.....  | 57 |
| Abbildung 19: | Schematische Darstellung der Merit Order im Jahr 2020, Quelle: ELIAS, PowerFlex.....   | 62 |
| Abbildung 20: | Schematische Darstellung der Modellierung batterieelektrischer Pkw im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex.....  | 65 |
| Abbildung 21: | Schematische Darstellung der Modellierung von Plug-In-Hybridfahrzeugen im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex.....  | 66 |
| Abbildung 22: | Schematische Darstellung von Input- und Output-Größen der Strommarktmodellierung mit PowerFlex und dem Modul Elektromobilität....  | 67 |

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 23: | Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – Basisszenario ohne Elektromobilität .....   | 74 |
| Abbildung 24: | Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), ohne Lademanagement („ohne LM 2“).....  | 75 |
| Abbildung 25: | Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), mit Lademanagement („mit LM 2“) .....   | 76 |
| Abbildung 26: | Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität und zusätzlicher onshore Windeinspeisung, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), mit Lademanagement („mit LM 2 Wind“).....  | 77 |
| Abbildung 27: | Graphische Darstellung des Brennstoffmixes der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2020.....  | 79 |
| Abbildung 28: | Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung („Fahrstrom“) und der gesamten Stromerzeugung sowie Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom 2020 .....  | 79 |
| Abbildung 29: | Graphische Darstellung des Brennstoffmixes der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2030.....  | 80 |
| Abbildung 30: | Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung („Fahrstrom“) und der gesamten Stromerzeugung sowie Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom 2030 .....  | 80 |
| Abbildung 31: | Differenz der CO <sub>2</sub> -Emissionen zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf nach vorgelagerten und direkten Emissionen für 2020.....   | 82 |
| Abbildung 32: | Differenz der CO <sub>2</sub> -Emissionen zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf nach vorgelagerten und direkten Emissionen für 2030.....   | 82 |
| Abbildung 33: | Nicht genutzte fluktuierende erneuerbare Energien in verschiedenen Modellläufen für 2030 im Vergleich zum Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge.....  | 86 |
| Abbildung 34: | CO <sub>2</sub> -Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, ohne Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs der Größenklasse „mittel“ mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischem Antrieb.....       | 94 |
| Abbildung 35: | CO <sub>2</sub> -Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, <b>mit</b> Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs der Größenklasse „mittel“ mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischem Antrieb..... | 95 |
| Abbildung 36: | Vergleich der jährlichen CO <sub>2</sub> -Emissionen eines konventionellen Benzin-Pkw mit einem Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischen Pkw im Jahr 2030. (Emissionsfaktor der Stromerzeugung bei zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Energien (Wind) und bei Lademanagement).....                           | 96 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 37: | Endenergiebedarf des Pkw-Bestands im Szenario Elektromobilität .....   | 97  |
| Abbildung 38: | Veränderung des Endenergiebedarfs im Szenario Elektromobilität gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge.....  | 97  |
| Abbildung 39: | CO <sub>2</sub> -Emissionen des Pkw-Bestands im Referenzfall ohne Elektromobilität und im Szenario Elektromobilität für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen ..... | 98  |
| Abbildung 40: | Veränderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen des Pkw-Bestands im Szenario Elektromobilität gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge .....              | 99  |
| Abbildung 41: | Mögliche Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw-Neuzulassungen unter Berücksichtigung des zunehmenden Anteils an Elektrofahrzeugen ..                            | 101 |

## Tabellenverzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | Zuordnungskriterien bei fehlender Angabe des KBA-Segments .....   | 26 |
| Tabelle 2:  | Einteilung von Fahrzeugsegmenten in Größenklassen .....   | 30 |
| Tabelle 3:  | Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge.....  | 35 |
| Tabelle 4:  | Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten von Technologieinnovationen im<br>Automobilsektor .....  | 41 |
| Tabelle 5:  | Struktur der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2010, Quelle: [11] .....  | 44 |
| Tabelle 6:  | Jahresfahrleistung differenziert nach Antriebstyp und Größenklasse.....   | 46 |
| Tabelle 7:  | Anteil von Plug-In-Hybrid- und batterieelektrischen Pkw an der<br>Gesamtfahrleistung, differenziert nach Energieträgereinsatz .....   | 49 |
| Tabelle 8:  | Kriterien zur Einteilung in Fahrzeugnutzungsprofile.....  | 54 |
| Tabelle 9:  | Überblick über die durchgeführten Modellläufe.....  | 68 |
| Tabelle 10: | Elektrische Nettoleistung konventioneller Kraftwerke nach Brennstoffen in den<br>betrachteten Szenariojahren .....  | 69 |
| Tabelle 11: | Nettoleistung und Nettostromproduktion der erneuerbaren Energien im<br>Basislauf ohne Elektromobilität in den betrachteten Szenariojahren .....   | 70 |
| Tabelle 12: | Erhöhte Stromproduktion aus Wind und Photovoltaik in den Szenarien mit<br>zusätzlichem Wind- bzw. Solarstrom .....  | 70 |
| Tabelle 13: | Erhöhte Kapazität und Stromproduktion aus Biogas in den Szenarien mit<br>zusätzlichen Biogasanlagen.....  | 71 |
| Tabelle 14: | Verwendete Brennstoff- und CO <sub>2</sub> -Preise .....  | 71 |
| Tabelle 15: | Inputbezogene Emissionsfaktoren für die in der Modellierung verwendeten<br>Energieträger.....   | 72 |
| Tabelle 16: | Kraftstoffverbrauch [l/100 km] der verbrennungsmotorischen Pkw-<br>Neuzulassungen nach NEFZ .....   | 90 |
| Tabelle 17: | CO <sub>2</sub> -Intensität von Otto- und Dieselmotoren [g CO <sub>2</sub> /kWh] unter<br>Berücksichtigung des ansteigenden Biokraftstoffanteils .....  | 91 |
| Tabelle 18: | CO <sub>2</sub> -Intensität der Stromerzeugung für Elektromobilität [g CO <sub>2</sub> /kWh] – Effekt<br>eines zusätzlichen Ausbaus von Erneuerbare-Energien-(EE-)Anlagen und von<br>Lademanagement (LM); Vergleich zur CO <sub>2</sub> -Intensität des deutschen<br>Strommixes ..... | 92 |
| Tabelle 19: | Spezifischer Energieverbrauch und elektrischer Fahranteil der<br>Vergleichsfahrzeuge im Jahr 2030.....  | 93 |

## Einleitung und Hintergrund zum Forschungsvorhaben

Deutschland will seine Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 reduzieren. Laut dem nationalen Inventarbericht konnten in den vergangenen 20 Jahren die Emissionen um 24 % gesenkt werden, bis 2020 müssen also noch weitere 16 % gemindert werden. Ein ambitioniertes Ziel, das nur erreicht werden kann, wenn alle relevanten Sektoren – Industrie, Haushalte, Energiewirtschaft und Verkehr – ihre Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen deutlich reduzieren. Wesentliche Sektoren haben bisher durchaus Erfolge vorzuweisen. Die Energiewirtschaft beispielsweise emittiert heute 20 %, das verarbeitende Gewerbe rund 40 % weniger als vor 20 Jahren [1]. Anders stellt sich die Situation im Verkehrssektor dar. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs haben sich zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt, verglichen mit 1990 sind sie um knapp 8 % gestiegen [1]. Verantwortlich dafür ist im Wesentlichen der Straßenverkehr, der im Jahr 2009 rund 178 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen hat und damit für 83 % der Emissionen im Verkehrssektor verantwortlich war.

Zwar sind heute Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor effizienter als noch vor 10 oder 15 Jahren. Diese Fortschritte verbessern die Gesamtbilanz aber kaum. Denn die technischen Optimierungen der vergangenen Jahre werden nahezu kompensiert. Zum einen ist die Popularität von schweren, leistungs- und verbrauchsstarken Modellen bei deutschen Autokäufern ungebrochen. Zum anderen steigt die Verkehrsleistung. Auch für die kommenden Jahre ist keine Trendwende in Sicht. Die letzte Verkehrsprognose geht davon aus, dass die Fahrleistung privater Pkw bis 2025 um 16 % höher liegen wird als 2004 [2].

Verbrennungsmotoren haben trotz aller technischen Fortschritte mit maximal 40 % einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad. Die im Kraftstoff enthaltene Energie geht zu einem großen Teil als Wärme verloren. Elektrische Fahrzeugmotoren hingegen haben im Betrieb eine deutlich höhere Energieeffizienz als Verbrennungsmotoren, sie erreichen Wirkungsgrade von rund 90 %. Das gilt für den batterieelektrischen Pkw genauso wie für den Elektromotor im so genannten Plug-In-Hybrid, der zusätzlich auch einen Verbrennungsmotor besitzt. Elektrofahrzeuge nutzen Strom statt flüssige Kraftstoffe und ermöglichen damit abgasarmes oder sogar abgasfreies Fahren. Und wesentlich ist, dass die Fahrzeuge ein großes Potenzial für eine klimaverträglichere Mobilität bergen, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energien geladen werden.

Unter anderem deshalb fördert die Bundesregierung die Elektromobilität in umfassender Weise. Ziel ist es, bis 2020 mindestens eine Million und bis 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland auf den Markt zu bringen.

### 1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Übergreifendes Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, zu untersuchen, wie hoch die Umweltentlastung durch Elektrofahrzeuge sein kann und welche Fragen hierfür entscheidend sind. Denn ein Elektrofahrzeug hat im elektrischen Betrieb zwar keine direkten Emissionen, da es elektrische Energie direkt in Antriebsenergie verwandelt und dafür weder Benzin, Diesel noch Gas verbrennt. Bei der Stromerzeugung können jedoch relevante Mengen an CO<sub>2</sub> entstehen. Große Unterschiede ergeben sich je nachdem, ob die zusätzliche Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen aus (zusätzlichen oder ansonsten ungenutzten) erneuerbaren oder aus fossilen Energien erzeugt wird. Ein konsistenter Vergleich von Elektrofahrzeugen und

konventionellen Pkw ist daher nur unter Berücksichtigung der Gesamtemissionsbilanz inklusiver der Energiebereitstellung möglich.

Wie stark elektrische Antriebe zum Klimaschutz beitragen können, hängt neben der Art der Stromerzeugung davon ab, wie viele Elektrofahrzeuge sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im Markt befinden, wie hoch deren Fahrleistung und der sich daraus ableitende reale Gesamtstrombedarf ist und welche konventionellen Fahrzeuge im Bestand ersetzt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM „Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“ wird daher ein integrativer Ansatz zur Bilanzierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen verfolgt, der neben der fahrzeugseitigen Betrachtung auch die Interaktionen mit dem Energiemarkt berücksichtigt. Ein solch integrativer Ansatz wurde in bisherigen Studien zu Elektrofahrzeugen meist nur ansatzweise verfolgt, was zum einen mit der unzureichenden Datenlage, insbesondere zur Fahrzeugnutzung, aber auch mit der neuartigen Interaktion zwischen Transport- und Energiesektor begründet sein mag. Um den Gesamtumweltnutzen einer verstärkten Einführung von Elektrofahrzeugen bewerten zu können, werden im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens daher folgende zentrale Ziele verfolgt:

» **Analyse der Akzeptanz und Attraktivität von Elektrofahrzeugen**

Grundlage für die Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale von Elektromobilität ist zunächst eine eingehende Analyse von Akzeptanz und Attraktivität verschiedener Fahrzeugkonzepte.

» **Ableitung von Marktpotenzialen für Elektrofahrzeuge**

Um abschätzen zu können, wie stark Elektrofahrzeuge zum Klimaschutz beitragen können, muss analysiert werden, ob sie die alltäglichen Mobilitätsbedürfnisse überhaupt erfüllen können. In Verbindung mit Annahmen zur Akzeptanz kann dann die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge bis ins Jahr 2030 abgeleitet werden.

» **Betrachtung der Interaktion mit dem Energiesektor**

Zur Ermittlung der Treibhausgasintensität der Strombereitstellung müssen unterschiedliche Interaktionsmöglichkeiten zwischen Elektrofahrzeugen und Energiesektor berücksichtigt werden: Unter anderem sollte die Wirkung unterschiedlicher Optionen des Ladeverhaltens auf den Kraftwerkspark und verschiedene Möglichkeiten der Strombereitstellung detailliert betrachtet werden.

» **Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Elektromobilität**

Ein abschließender Vergleich mit der Treibhausgasbilanz von zukünftigen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ermöglicht eine umfassende Bewertung des Umweltnutzens von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Optionen der Energieerzeugung.

Im Kern wird also untersucht, wie hoch die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen sein könnte, wie diese Fahrzeuge genutzt werden und wie sich deren Nutzung unter Berücksichtigung des Ladens auf die Stromerzeugung und damit die Emissionen auswirkt. Der vorliegende Ergebnisbericht beschäftigt sich mit diesen Kernfragen in den folgenden Kapiteln. Ausgenommen ist das Thema „Akzeptanz und Attraktivität“, das in einem separaten Ergebnisbericht [3] ausführlich dargestellt ist.

## 1.2 Konzeption des Forschungsvorhabens

Die Ableitung von Marktpotenzialen für Elektromobilität bis zum Jahr 2030 sowie die Bestimmung der möglichen Umweltauswirkungen mit Fokus auf die CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale erfordert ein mehrstufiges Vorgehen, welches sowohl die zukünftigen Rahmenbedingungen und mögliche Nutzungsmuster abbildet als auch die Wechselwirkungen mit der Energiewirtschaft berücksichtigt.

Ausgehend von den formulierten Zielen des Forschungsvorhabens wurden daher mehrere Arbeitsschritte definiert. Im Folgenden werden diese in Kürze dokumentiert, um deren zentrale Inhalte, und insbesondere aber auch deren Zusammenspiel überblicksartig zu veranschaulichen (Abbildung 1). In den folgenden Kapiteln werden anschließend die einzelnen Analyseschritte und das methodische Vorgehen ausführlich diskutiert und die zentralen Ergebnisse dokumentiert.

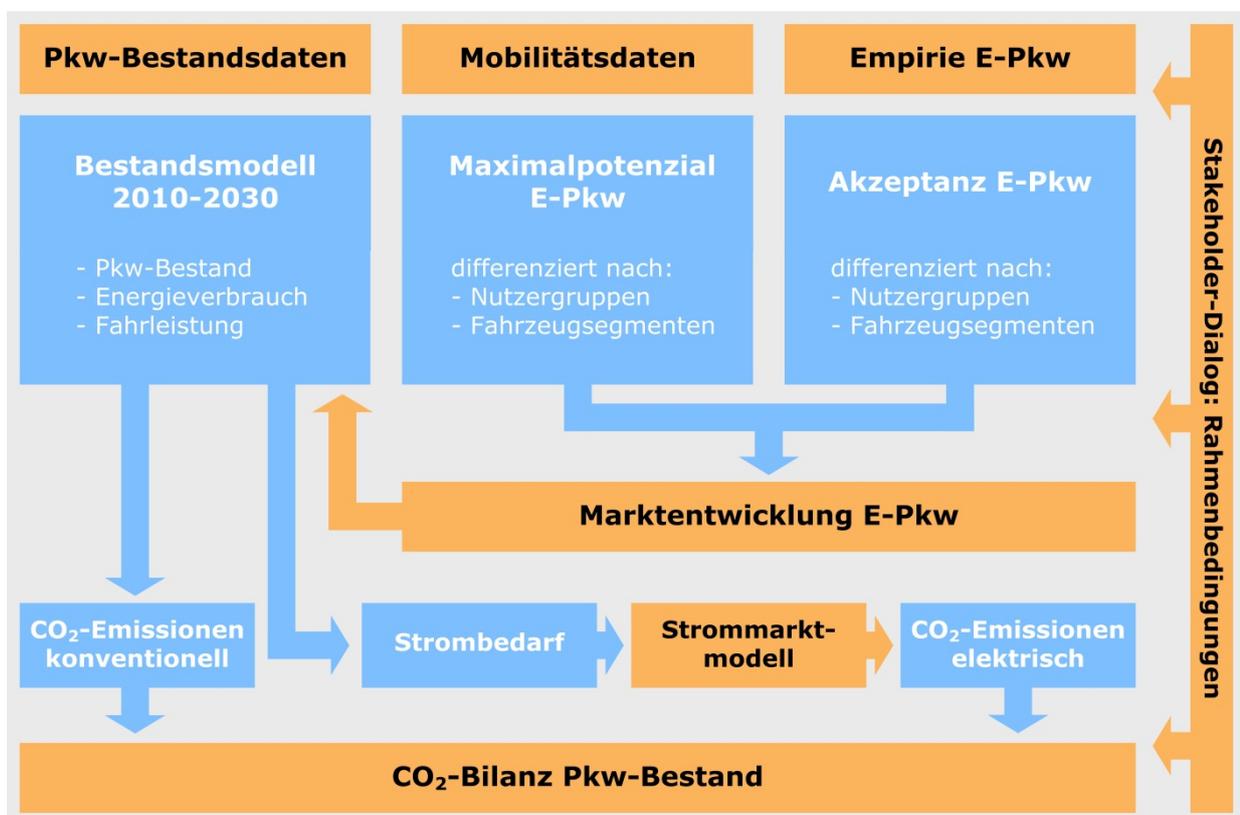


Abbildung 1: Modellkonzept OPTUM

### **Szenarioprozess**

Die Voraussetzung zur Quantifizierung der zukünftigen Marktpotenziale und des CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzials von Elektromobilität ist die Definition plausibler Rahmenbedingungen für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2030. Neben realistischen Annahmen zur weiteren technologischen Entwicklung müssen auch weitere Einflussgrößen, wie die Veränderung der Energiepreise und die zukünftige Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks, berücksichtigt werden.

Begleitend zum Forschungsvorhaben wurde daher ein Szenarioprozess initiiert sowie weitere Expertenkonsultationen im Rahmen eines Experten-Workshops Elektromobilität durchgeführt. Im Verlauf dieser Veranstaltungsreihe wurden mit Vertretern aus Energie- und Verkehrswirtschaft sowie Verbänden mögliche Entwicklungspfade diskutiert und schließlich in einem konsolidierten Szenario zusammengeführt. Dieses Szenario bildet die Grundlage der folgenden Potenzial- und CO<sub>2</sub>-Betrachtungen

### **Marktentwicklung Elektromobilität**

Die Marktentwicklung von Elektromobilität stellt den bis zum Jahr 2030 tatsächlich möglichen Marktanteil von Elektrofahrzeugen an den jährlichen Pkw-Neuzulassungen dar. Für eine fundierte Abschätzung dieser Größe müssen mehrere Einflussparameter berücksichtigt werden.

Das Maximalpotenzial beschreibt den, auf Grund seiner Nutzungsmuster, theoretisch substituierbaren Anteil des bundesdeutschen Pkw-Bestands. Es berücksichtigt die technischen Restriktionen von Elektrofahrzeugen und bestimmt, welche Fahrzeuge unter diesen Rahmenbedingungen bei unveränderten Einsatzmustern das jeweilige Mobilitätsbedürfnis weiterhin befriedigen könnten. Neben der Betrachtung technischer Einsatzrestriktionen spielt die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei potenziellen Käufern eine entscheidende Rolle für die Marktentwicklung von Elektromobilität. Im Rahmen einer empirischen Akzeptanzanalyse wird daher ermittelt, unter welchen Umständen Pkw-Nutzer sich für ein Elektrofahrzeug entscheiden würden.

Aus der Kombination von Maximalpotenzial und Akzeptanz ergibt sich ein Marktpotenzial, das die Obergrenze des möglichen Marktanteils von Elektrofahrzeugen im Betrachtungszeitraum darstellt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Angebotsentwicklung („Technologiediffusion“), welche dem Umstand Rechnung trägt, dass sich die Verfügbarkeit einer neuen Technologie im Markt erst mit der Zeit entwickelt, kann die tatsächlich realisierbare Marktentwicklung von Elektromobilität in Form von Anteilen an den jährlichen Pkw-Neuzulassungen dargestellt werden.

### **Pkw-Bestandsentwicklung**

Der Pkw-Bestand in Deutschland entwickelt sich dynamisch: neue Fahrzeuge kommen in den Bestand, Altfahrzeuge scheiden aus dem Bestand aus. Entsprechend des Anteils von Elektrofahrzeugen an den jährlichen Neuzulassungen steigt auch der absolute Bestand an Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2030 an.

Das entwickelte Bestandsmodell bietet die Möglichkeit, die Struktur des bundesdeutschen Pkw-Bestands jahresscharf und differenziert nach Größenklassen und Antriebstypen abzubilden und die Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen für den Betrachtungszeitraum

2010 bis 2030 zu simulieren. Da für jede Fahrzeugkategorie die Jahresfahrleistung und der spezifische Energieverbrauch differenziert nach Neuzulassungsjahr hinterlegt sind, können mit dem Bestandsmodell die Entwicklung der (elektrischen) Gesamtfahrleistung sowie die Entwicklung des Energiebedarfs differenziert nach Energieträgern für den Pkw-Verkehr bis zum Jahr 2030 abgebildet werden.

Die Daten zur Pkw-Bestandsentwicklung inklusive der Informationen zu Fahrleistungs- und Energienachfrageentwicklung bilden ferner die modelltechnische Grundlage für die Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Effekte.

### **Fahrzeugnutzungsprofile Elektromobilität**

Fahrzeugnutzungsprofile beschreiben den täglichen Einsatz von Pkw in Deutschland und geben u.a. Aufschluss über die Anzahl der Fahrten, die Tagesfahrleistung und Ziel bzw. Standort des Fahrzeugs. Die Profile können auf Grundlage der repräsentativen Verkehrserhebung „Mobilität in Deutschland“ MiD 2008 für eine umfassende Stichprobe an Haushalten mit eigenem Pkw bestimmt werden.

Die Nutzungsprofile von Elektrofahrzeugen sind notwendig, um deren Stromnachfrage in stündlicher Auflösung zu quantifizieren und Wechselwirkungen mit der Stromwirtschaft simulieren zu können. Zu diesem Zweck werden aggregierte typische Wochennutzungsprofile für Elektrofahrzeuge generiert. Sie bestimmen, welche zusätzliche Stromnachfrage durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen entsteht und zu welchen Zeitpunkten die Batterieladung erfolgen kann.

### **Integration von Elektromobilität in den Strommarkt**

Durch die zunehmende Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage, die durch die Stromwirtschaft befriedigt werden muss.

Auf Grundlage der ermittelten Bestandsentwicklung und in Kombination mit den definierten Fahrprofilen kann die Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen zeitlich aufgelöst dargestellt werden. Dabei können die Auswirkungen unterschiedlicher Ladeinfrastrukturannahmen sowie ein variables Ladeverhalten der Nutzer simuliert werden. Die Modellierung des Strommarkts mit dem Strommarktmodell PowerFlex ermöglicht es, die daraus resultierenden Effekte auf den Kraftwerkseinsatz für den Zeitraum 2010 bis 2030 darzustellen und den mit der zusätzlichen Stromerzeugung verbundenen Brennstoffeinsatz sowie die Menge an zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu quantifizieren.

### **CO<sub>2</sub>-Bilanz Elektromobilität**

Im elektrischen Betrieb verursachen Elektrofahrzeuge keine CO<sub>2</sub>-Emissionen, jedoch kann – je nach Erzeugungsart – die Strombereitstellung mit erheblichen Emissionen verbunden sein. Herkömmliche Pkw verursachen den Hauptanteil der Gesamtemissionen im Betrieb, die Kraftstoffbereitstellung ist mit relativ geringen Emissionen verbunden.

Der Emissionsvergleich verschiedener Antriebsoptionen erfordert daher eine Gesamtbetrachtung (Well-to-Wheel-Ansatz), die sowohl die direkten als auch die indirekten Emissionen des Fahrzeugantriebs berücksichtigt.

Für den Vergleich auf Einzelfahrzeugebene werden die Ergebnisse der Strommarktmodellierung genutzt und die CO<sub>2</sub>-Intensität der Strombereitstellung mit der Stromnachfrage entsprechend der erstellten Nutzungsprofile gekoppelt.

Eine Gesamtbetrachtung des deutschen Pkw-Bestands erlaubt es, auf Basis des entwickelten Bestandsmodells die möglichen CO<sub>2</sub>-Minderungseffekte eines zunehmenden Anteils an Elektrofahrzeugen zu quantifizieren. Bei der Bilanzierung wird die Marktentwicklung Elektromobilität einer Alternativentwicklung ohne Elektrofahrzeuge gegenübergestellt, um die Umweltwirkung von Elektromobilität im Kontext des Gesamtsystems zu beurteilen.

## Szenarioprozess

Ein zentraler Punkt in der Betrachtung der Marktentwicklung und der Treibhausgasmindierungspotenziale durch Elektromobilität ist die Formulierung von plausiblen Rahmenbedingungen für den betrachteten Zeitraum bis ins Jahr 2030. Neben Annahmen zur technologischen Entwicklung der elektrischen Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur müssen daher beispielsweise die Kostenentwicklung der Fahrzeuge und der Kraftstoffe sowie Entwicklungen im Stromsektor in Szenarien zusammengefasst werden. Ziel dieser Szenarioentwicklung ist es nicht, Prognosen über den zukünftigen Elektrofahrzeugmarkt zu erstellen und bestimmte Annahmen zu bewerten. Vielmehr soll in dem untersuchten Szenario mit dem in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Modell ein möglicher Entwicklungspfad für Elektromobilität unter Berücksichtigung plausibler und konsistenter Rahmenbedingungen abgebildet werden.

### 2.1 Stakeholder-Dialog & Experten-Workshop

Ein bedeutendes Element für die Ausgestaltung von Szenarien mit plausiblen und konsistenten Rahmenbedingungen war daher im Forschungsvorhaben OPTUM der Austausch mit für das Thema Elektromobilität relevanten Akteuren. Zum einen fand zu Beginn des Forschungsvorhabens ein Arbeitstreffen mit Experten verschiedener Fachrichtungen statt, um eine Übersicht über den aktuellen Wissensstand und über wahrscheinliche Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität zu erlangen.

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wurde in vier Sitzungen der Austausch mit gesellschaftlich relevanten Akteuren fortgesetzt, um die Methodik der Modellentwicklung und mögliche Szenarioannahmen zur Diskussion zu stellen und Anmerkungen der Teilnehmer des Stakeholder-Dialogs in die hier präsentierten Betrachtungen mit einfließen zu lassen. Im sogenannten „Joint Fact Finding“ wurde von Seiten der Forschungsnehmer somit hohe Transparenz in Bezug auf die Modell- und Szenariomentwicklung gewährleistet, um unter den für die weitere Meinungsbildung und den politischen Prozess relevanten Akteuren eine möglichst hohe Akzeptanz für die Ergebnisse der Untersuchungen und die sich daraus ableitbaren Handlungsempfehlungen bezüglich der Umweltaspekte von Elektromobilität zu erlangen.

Zudem war dieser partizipative Ansatz zur Szenariomentwicklung generell geeignet, den Diskurs der beteiligten gesellschaftlichen Akteure mit dem Bundesumweltministerium zu den Herausforderungen und Auswirkungen von Elektromobilität zu bereichern und zu verfestigen. Insgesamt waren Teilnehmer der / von

- » Automobilwirtschaft
- » Energiewirtschaft
- » Mobilitätsanbietern
- » Technologieunternehmen
- » Verbraucherverbänden
- » Umweltschutzverbänden
- » Unternehmerverbänden

an den Diskussionen im Modell- und Szenarioprozess beteiligt, wodurch ein breites Spektrum an Meinungen und Sichtweisen in die Szenarientwicklung einbezogen werden konnte.

## 2.2 Szenarioannahmen

Elektromobilität steht am Beginn des Markteintritts und erste Serienfahrzeuge mit elektrischem Antrieb werden mittlerweile als Alternative zu konventionellen Pkw zum Verkauf angeboten. Angesichts dieses frühen Entwicklungsstadiums des Elektromobilitätsmarktes stellt die Ableitung zukünftiger Marktpotenziale von Elektromobilität und deren Emissionsminderung eine besondere Herausforderung dar und ist mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet.

Diese Unsicherheiten beziehen sich auf die weiteren technologischen Optimierungs- und Kostenminderungspotenziale der Antriebs- und Batterietechnologie, die Entwicklung der notwendigen Infrastruktur, aber auch des zukünftigen Mobilitätsverhaltens sowie der Entwicklung weiterer Rahmenbedingungen, wie der Energiepreisentwicklung, staatlicher Fördermaßnahmen oder der Entwicklung der Stromnachfrage und des deutschen Kraftwerksparks.

Sollen die möglichen zukünftigen Potenziale von Elektromobilität quantifiziert werden, so müssen diesbezüglich möglichst plausible Annahmen getroffen werden. Die Ausgestaltung eines Szenarios bietet dabei die Möglichkeit, einen Satz an plausiblen Ausprägungen relevanter Einflussgrößen in einem Szenario zu bündeln und dessen Wirkung im Vergleich zu Alternativentwicklungen aufzuzeigen. Durch Sensitivitätsanalysen, d.h. durch die Variation einzelner Parameter, lässt sich ferner der Einfluss einzelner Parameter auf das Gesamtergebnis quantifizieren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde unter Beteiligung relevanter gesellschaftlicher Akteure für Elektromobilität (Abschnitt 2.1) ein Szenario entwickelt, welches eine plausible zukünftige Entwicklung von Elektromobilität und wichtige Rahmenbedingungen beschreibt und somit die Grundlage für die Analysen zum Marktpotenzial, den Wechselwirkungen mit dem Strommarkt und den möglichen Umweltentlastungseffekten darstellt. Neben der Szenariodiskussion im Rahmen des im Forschungsvorhaben durchgeführten Stakeholder-Dialogs wurden die Szenarioannahmen dabei mit Veröffentlichungen der Nationalen Plattform Elektromobilität und weiteren Angaben von Experten und Annahmen aus der Fachliteratur abgeglichen.

Die zukünftige Entwicklung des Kraftwerksparks wurde mit dem Kraftwerkinvestitionsmodell des Öko-Instituts ELIAS modelliert. Für den Ausbaupfad der erneuerbaren Energien wurde [4] zugrunde gelegt. Damit beträgt der Anteil erneuerbarer Energien 37 % im Jahr 2020 und 51 % im Jahr 2030. Die detaillierteren Annahmen für die Strommarktmodellierung finden sich in Abschnitt 6.4.

Auf den folgenden Seiten werden die wesentlichen Rahmenbedingungen des entwickelten Szenarios im Überblick dokumentiert. Angesichts der zahlreichen Einflussgrößen wird an dieser Stelle zu Gunsten der Übersichtlichkeit auf eine detaillierte Darstellung aller Szenarioparameter verzichtet. Im Anhang A findet sich eine vollständige Übersicht aller Parameter inklusive ihrer Ausprägung in den betrachteten Jahren.

### 2.2.1 Fahrzeugtechnik & -kosten

Grundlage für die Analyse von Marktpotenzialen und Umwelteffekten von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2030 ist die Definition von Referenzfahrzeugen, mit denen repräsentativ die Fahrzeugentwicklung bis ins Jahr 2030 beschrieben werden kann. Während die elektrische Reichweite und die Kostenstruktur (Kraftstoffkosten und Batteriekosten) von Elektrofahrzeugen besonders relevante Einflussgrößen für die Bestimmung des Marktpotenzials darstellen, ist der Energieverbrauch von maßgeblicher Bedeutung für die Emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen.

Neben den Entwicklungsperspektiven von Elektrofahrzeugen muss aber auch die weitere Optimierung der konventionellen, d.h. alleine mit einem Verbrennungsmotor für den Vortrieb ausgestatteten, Vergleichsfahrzeuge (CV) im Szenario mit in Betracht gezogen werden, um die Konkurrenzsituation dieser Technologien abbilden zu können.

Folgende Grundannahmen werden für das betrachtete Szenario getroffen:

- » Als Elektrofahrzeuge werden bis ins Jahr 2030 rein batterieelektrische Pkw (City-BEV<sup>1</sup> / BEV<sup>2</sup>) und Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV<sup>3</sup>) auf dem Markt angeboten werden.
- » City-BEV stehen nur in dem KBA-Segment „Mini“ zur Verfügung, BEV sind dagegen in den Segmenten „Mini“ bis „Kompaktklasse“<sup>4</sup> verfügbar. Für PHEV bestehen keine Begrenzungen bezüglich der Fahrzeuggrößenklasse.
- » Die nominelle elektrische Reichweite von City-BEV / BEV beträgt im Mittel 100 km bzw. 160 km. Für PHEV wird eine nominelle elektrische Reichweite von 50 km angesetzt, die Gesamtreichweite liegt dabei in der Größenordnung heutiger, konventioneller Fahrzeuge.
- » Der Energieverbrauch beim elektrischen Fahren variiert je nach Größenklasse und Fahrzeugtyp und verringert sich bis 2030 durch weitere Effizienzmaßnahmen stetig. Werden PHEV im verbrennungsmotorischen Modus betrieben, entspricht der Energieverbrauch dem von konventionellen Pkw.
- » Der Energieverbrauch der konventionellen verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeuge (CV) verbessert sich durch den Einsatz von Effizienztechnologien gegenüber heute um 28 % (2020) bzw. 36 % (2030)<sup>5</sup>.

---

1 City-BEV: City-BEV stellen auf den Stadtverkehr optimierte batterieelektrische Stadtfahrzeuge dar, die mit einer geringeren, aber für den Stadtverkehr ausreichenden Reichweite ausgestattet sind und für den Vortrieb alleine einen Elektromotor besitzen, der durch eine Batterie gespeist wird, die über die Verbindung zum Stromnetz geladen werden kann.

2 BEV (battery electric vehicle): BEV besitzen eine im Vergleich zu City-BEV höhere Reichweite und sind für den Vortrieb ebenfalls ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet, der durch eine Batterie gespeist wird, die über die Verbindung zum Stromnetz geladen werden kann. Aufgrund der größeren Batterie sind die Anschaffungskosten im Vergleich zu City-BEV-Fahrzeugen höher.

3 PHEV (plug-in hybrid electric vehicle): PHEV besitzen neben einem Elektroantrieb, dessen Batterie über die Verbindung zum Stromnetz geladen werden kann, einen Verbrennungsmotor zum Vortrieb, der zum Einsatz kommt, wenn die Batterie für den Einsatz des Elektromotors keine Energie mehr besitzt.

4 Inklusive des KBA-Segments „Mini-Vans“

- » Da der Realenergieverbrauch durchschnittlich 10 % über dem Normverbrauch liegt und eine Mindestreserve der Batterie von 15 km / 20 km angenommen wird, ergibt sich für City-BEV / BEV eine reale Reichweite von etwa 75 km bzw. 124 km.
- » Die Zusatzkosten der Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Pkw ergeben sich im Wesentlichen durch den Aufpreis der Batterie. Die Batteriekosten sinken im Szenario von 500 €/kWh (aktuell) auf 280 €/kWh (2020) bzw. 230 €/kWh (2030)<sup>6</sup>. Für PHEV entstehen zudem Mehrkosten durch den benötigten zweiten Antriebstrang.

### 2.2.2 Ladeinfrastruktur

Eine ausreichende Infrastruktur von Batterieladestationen ist eine essentielle Voraussetzung für die Marktentwicklung und den Einsatz von Elektrofahrzeugen. Zahl, Typ und Ort der Ladestationen entscheiden über die Möglichkeit zur Substitution von konventionellen Pkw durch Elektrofahrzeuge. Nur wenn am Standort des Fahrzeugs eine Ladestation zur Verfügung steht und die Standdauer zur Batterieladung ausreicht, ist der Einsatz eines elektrisch betriebenen Pkw theoretisch möglich.

Neben der Marktentwicklung hat die Ladeinfrastruktur zudem einen Einfluss, wann, wo und mit welcher Ladeleistung die Fahrzeugbatterien für die weitere Nutzung aufgeladen werden. Somit hat die Entwicklung der Ladeinfrastruktur auch einen entscheidenden Einfluss auf von Elektromobilität ausgehende Effekte auf den Stromsektor.

Ausgehend von den Annahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität und den Diskussionen im Rahmen der Stakeholder-Beteiligung werden für die Ladeinfrastruktur folgende Annahmen getroffen:

- » Die Leistung der Ladestationen auf dem eigenen Grundstück und am Arbeitsplatz beträgt 3 kW (2020) bzw. 7 kW (2030). An allen sonstigen Standorten wird für beide betrachteten Jahre von einer maximalen Ladeleistung von 11 kW ausgegangen.
- » Fahrzeuge, die über keinen Stellplatz auf dem eigenen Privatgrundstück verfügen, sondern im Regelfall im (semi-)öffentlichen Raum geparkt werden, haben zu 30 % (2020) bzw. zu 50 % (2030) gesicherten und regelmäßigen Zugang zu öffentlichen Ladestationen.
- » Grundsätzlich können Elektrofahrzeuge, sobald sie geparkt sind, mit den in den Szenarien für die jeweiligen Standorte hinterlegten Ladeleistungen geladen werden.
- » Für Ladevorgänge wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 90 % angenommen.

---

5 Die Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw berücksichtigt die Vorgaben des EU-Flottengrenzwerts und orientiert sich an den in TREMOD, Version 5, getroffenen Annahmen [12].

6 In Anlehnung an die Angaben der NPE [27]

### 2.2.3 Energiepreisentwicklung

Die zukünftige Energiepreisentwicklung ist von maßgeblicher Bedeutung für die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Pkw, da zumindest teilweise die Mehrkosten in der Anschaffung über geringere Betriebskosten wieder ausgeglichen werden. Gleichzeitig sind Prognosen zur Energiepreisentwicklung mit großen Unsicherheiten behaftet.

In der Szenarioentwicklung wurde das Referenzszenario aus der Studie „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ als Grundlage herangezogen [5]. In Ergänzung wurden weitere Sensitivitätsbetrachtungen angestellt, um den Einfluss veränderter Strom- und Kraftstoffpreise auf die Akzeptanz von Elektromobilität zu illustrieren bzw. weitere Kosten, wie beispielsweise Nutzungsentgelte für die Ladeinfrastruktur oder eine Fahrstromsteuer abzubilden. Die Grundannahmen aus dem Referenzszenario in [5] sind:

- » Ein Anstieg des Benzinpreises für Endkunden (inklusive Steuern) auf 1,52 €/l (2020) bzw. 1,69 €/l (2030).
- » Ein Anstieg des Strompreises für Haushaltskunden auf 21,7 €cent/kWh (2020) bzw. 22,2 €cent/kWh (2030).

### 2.2.4 Mobilitätsverhalten

Die Art und Weise der Fahrzeugnutzung stellt eine wesentliche Einflussgröße für das Potenzial von Elektrofahrzeugen dar. Stehen die Fahrzeugnutzung und Mobilitätsbedürfnisse im Konflikt zu den grundsätzlichen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen, so ist die Substitution eines konventionellen Pkw durch ein Elektrofahrzeug äußerst unwahrscheinlich.

Neben dem Marktpotenzial wird auch der Stromsektor entscheidend durch die Art der Fahrzeugnutzung und das Mobilitätsverhalten beeinflusst. Da sich aus der Fahrzeugnutzung die Energieverbräuche, Standzeiten und -orte der einzelnen Fahrzeuge ergeben, ist das Mobilitätsverhalten damit der entscheidende Faktor für Restriktionen der Fahrzeugladung. Im Szenario werden diesbezüglich daher folgende Annahmen getroffen:

- » Es ist davon auszugehen, dass sich beim Einsatz von batterieelektrischen Pkw die Flexibilität der Fahrzeugnutzung durch die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen geringere Reichweite und längeren Ladezeiten grundsätzlich verringert. Es wird dennoch angenommen, dass ein batterieelektrischer Pkw nur dann als Ersatz in Frage kommt, wenn es die Mobilitätsbedürfnisse bezüglich der Fahrzeugnutzung, aber auch der Fahrzeuggröße in gleicher (oder ähnlicher) Weise erfüllen kann. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge treten die Beschränkungen in Bezug auf Reichweite und Ladedauer allerdings nicht auf.
- » Nutzungskonflikte können insbesondere bei unregelmäßigen langen Fahrten auftreten, die bei Überschreiten der Reichweite mit batterieelektrischen Fahrzeugen nicht bewältigt werden können. Für die Berücksichtigung dieser Fälle werden folgende Annahmen getroffen:

- » Aufgrund der geringen Reichweite können City-BEV nur dann ein konventionelles Fahrzeug ersetzen, wenn ein weiterer Pkw ohne Reichweitenbeschränkung im Haushalt vorhanden ist.
- » Bei der Betrachtung der BEV wird davon ausgegangen, dass von Fahrzeugbesitzern maximal acht Nutzungskonflikte aufgrund von Reichweitenüberschreitungen im Jahr toleriert werden. Diese maximal acht Fahrten – d.h. vier Hin- und Rückfahrten – werden von den Besitzern der batterieelektrischen Fahrzeuge somit mit einem anderen Verkehrsmittel zurückgelegt bzw. mit einer Zwischenladung an Schnellladestationen bewältigt.
- » Das heutige Mobilitätsverhalten ändert sich bis zum Jahr 2030 nur unwesentlich, so dass heutige Mobilitätsmuster die Grundlage für Nutzung von elektrischen Fahrzeugen bilden.

### 2.2.5 Modellansatz

Abschließend für die Darstellung der Szenarioannahmen wird an dieser Stelle auf einen grundlegenden Ansatz in der Betrachtung der Marktentwicklung elektrischer Fahrzeuge eingegangen. Einige Modellteile dieser Studie basieren auf der Datenerhebung MiD 2008<sup>7</sup>, in der das Mobilitätsverhalten privat genutzter Pkw erfasst ist. In der im Forschungsvorhaben durchgeführten Befragung zur Bestimmung der Akzeptanz für Elektromobilität wurden ebenfalls ausschließlich private Neuwagenkäufer berücksichtigt, so dass in der Modellierung implizit davon ausgegangen wird, dass der gewerbliche Flottensektor sich in Bezug auf die Marktentwicklung und die Fahrzeugnutzung auf dieselbe Art und Weise verhält wie der private Fahrzeugmarkt.

Dieses Vorgehen wird durch zwei Punkte gerechtfertigt. Es fällt zwar ein hoher Anteil der Neuzulassungen auf gewerbliche Fahrzeuge – diese sind über Dienstwagen zumindest zum Teil in der MiD 2008 und in der eigenen Befragung erfasst. Im Bestand stellen gewerbliche Flottenfahrzeuge allerdings nur einen kleinen Teil des deutschen Pkw-Bestands, der durch das Vorgehen vernachlässigt und implizit bestimmt wird. Zudem ist der Restwert der Fahrzeuge ein entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Betrachtung beim Fahrzeugkauf durch Flottenbetreiber. Ein wichtiger Faktor für den Verkaufswert auf dem Gebrauchtwagenmarkt ist u.a. die Akzeptanz der privaten Gebrauchtwagenkäufer, so dass der private Fahrzeugmarkt einen starken Einfluss auf die Kaufentscheidung bei gewerblichen Fahrzeugflotten besitzt.

---

7 Eine Grundlage der Potenzialabschätzungen und der Ableitung von Fahrprofilen ist die repräsentative Datenerhebung MiD 2008, in der das Mobilitätsverhalten von Haushalten in Deutschland erfasst wurde.

## Marktentwicklung Elektromobilität

Die Marktentwicklung elektrischer Fahrzeuge wird in diesem Forschungsvorhaben unter Berücksichtigung von drei Faktoren bestimmt. Das Maximalpotenzial betrachtet das heutige Mobilitätsverhalten und leitet daraus das maximale Substitutionspotenzial elektrischer Pkw ab (Abschnitt 3.1). Über die Simulation einer Kaufentscheidungssituation, in der zwischen drei vergleichbaren Fahrzeugen der drei Fahrzeugtypen batterieelektrischer Pkw, Plug-In-Hybrid-Pkw und konventioneller Pkw entschieden werden muss, wird die Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge ermittelt (Abschnitt 3.2), die ein bedeutender Faktor für die Marktentwicklung elektrischer Fahrzeuge ist. Für die Ableitung der Marktentwicklung und die sich daraus in Deutschland ergebenden Neuzulassungen von elektrischen Fahrzeugen wird in Abschnitt 3.4 zudem die Angebotsentwicklung von elektrischen Fahrzeugen berücksichtigt, die einen dämpfenden Faktor für die Marktentwicklung darstellt.

### 3.1 Maximalpotenzial Elektromobilität

Das Maximalpotenzial für Elektromobilität beschreibt den Anteil an Pkw im deutschen Bestand, der aufgrund der jeweiligen Größenklasse, insbesondere aber in Bezug auf die Pkw-Nutzung, im betrachteten Zeitraum von 2010 bis 2030 theoretisch durch Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb gemäß der Szenariodefinition (Kapitel 2.2) substituiert werden könnte. Entscheidend für die Ableitung dieses maximalen Potenzials für die Substitution konventioneller Pkw durch elektrische Fahrzeuge ist die Annahme, dass sich die Mobilitätsbedürfnisse und somit das Mobilitätsverhalten bis ins Jahr 2030 nur unwesentlich ändern und mit elektrischen Fahrzeugen somit im Vergleich zu heute dieselben Fahrten mit Pkw derselben Größenklasse zurückgelegt werden.

In diesem ersten Analyseschritt stehen also die Fahrzeugnutzung sowie die Größenklasse der Fahrzeuge im Vordergrund der Betrachtung. Weitere Restriktionen wie Kundenakzeptanz und die Fahrzeugangebotsentwicklung werden erst in den folgenden Schritten der Modellierung der Marktentwicklung berücksichtigt.

Wesentliche Einflussfaktoren für die Ableitung des Maximalpotenzials sind somit:

- » das KBA-Fahrzeugsegment,
- » die Tagesfahrleistung,
- » die Standzeiten und -orte<sup>8</sup>,
- » die Wahrscheinlichkeit von Nutzungskonflikten bei langen Fahrten,
- » regelmäßige Verfügbarkeit einer Ladestation,
- » Verfügbarkeit weiterer Fahrzeuge im Haushalt.

---

<sup>8</sup> Von Relevanz für die Ladeleistung während der Batterieladung.

### 3.1.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die Maximalpotenzialanalysen bildet die umfassende Mobilitätsdatenerhebung „Mobilität in Deutschland“ [6]. Diese Datenerhebung stellt eine repräsentative Stichprobe des Bestands privat genutzter Pkw in Deutschland dar und dokumentiert für jeweils einen Stichtag detailliert das Mobilitätsverhalten einzelner Haushalte in Deutschland. Insgesamt wurde in der MiD 2008 das Mobilitätsverhalten von rund 77.000 Personen aus etwa 26.000 Haushalten für jeweils einen Stichtag aufgenommen.

Da in den befragten Haushalten alle Haushaltsmitglieder Angaben zu ihrem Mobilitätsverhalten an dem jeweiligem Stichtag gemacht haben, bietet die MiD eine gute Basis, das Mobilitätsverhalten auf Haushaltsebene zu analysieren und somit bei der Untersuchung alle Fahrten eines Haushalts-Pkw zu berücksichtigen. Zudem wurden die teilnehmenden Haushalte über ein Jahr verteilt befragt, so dass die Daten der MiD nicht durch ein unterschiedliches Mobilitätsverhalten infolge der Jahreszeit und des Wetters verzerrt werden. Insgesamt haben die Befragten der MiD zusammen etwa 193.000 Wege an dem jeweiligen Stichtag zurückgelegt.

Neben maximal 12 Wegen – darunter befinden sich beispielsweise auch zu Fuß, mit dem Fahrrad oder mit der Bahn zurückgelegte Wege – , die jede befragte Person für den jeweiligen Stichtag angeben konnte, stehen für alle Haushalte soziodemographische Daten sowie Informationen über generelle Einstellungen zu Mobilität und über die Pkw, die sich im Haushaltsbesitz befinden, zur Verfügung.

Auf den folgenden Seiten wird in Abschnitt 3.1.2 auf die grundsätzliche Idee für die Ableitung des Maximalpotenzials eingegangen. Die dafür notwendige Datenaufbereitung sowie die Ergebnisse der Maximalpotenzialbestimmung sind in den Abschnitten 3.1.3 und 3.1.5 dargestellt, bevor das Maximalpotenzial in Kapitel 3.1.6 auf die Sensitivität bezüglich einzelner Parameter der Potenzialbestimmung analysiert wird.

### 3.1.2 Modellansatz

Zur Bestimmung des Maximalpotenzials für elektrische Fahrzeuge wird ein zweistufiger Modellansatz gewählt (Abbildung 2). Auf der einen Seite soll das alltägliche Mobilitätsverhalten betrachtet werden und als Grundlage für die Ableitung des Maximalpotenzials dienen. Für diese Betrachtung wurden die als „normal“ deklarierten Fahrten aus den Datensätzen der MiD 2008 herausgefiltert und in einen Datensatz mit Wochennutzungsprofilen einzelner Fahrzeuge umgewandelt. Die Besonderheit des Vorgehens liegt vor allem in der Tatsache begründet, dass bei dem gewählten Vorgehen nicht einzelne Fahrten oder die Fahrzeugnutzung von einzelnen Personen betrachtet wird, sondern die Fahrzeugnutzung durch mehrere Haushaltsmitglieder und somit die Summe aller Fahrten eines Tages zur Potenzialbestimmung verwendet wird. Die dafür notwendige Datenaufbereitung der Daten der MiD 2008 und die Erstellung eines Datensatzes für die alltägliche Fahrzeugnutzung in Deutschland, der in diesem Forschungsvorhaben u.a. auch zur Ableitung von typischen Nutzungsprofilen verwendet wird, ist im nächsten Abschnitt detailliert beschrieben.

Auf der anderen Seite soll das allgemeine Mobilitätsverhalten Berücksichtigung in der Potenzialbetrachtung finden. Es fließt somit nicht nur das Alltagsverhalten in die Bewertung des Maximalpotenzials ein, sondern es werden auch unregelmäßige lange Fahrten beispielsweise in den Urlaub oder auf Dienstreisen berücksichtigt. Dafür wird aus allen in der MiD aufgeführten Fahrten die Wahrscheinlichkeit für die Häufigkeit des Auftretens von

Reichweitenüberschreitungen batterieelektrischer Fahrzeuge abgeleitet und somit das allgemeine Mobilitätsverhalten in der Bestimmung des Maximalpotenzials berücksichtigt.

Als Grundlage für alle Betrachtungen bezüglich des Maximalpotenzials dienen die in Abschnitt 2.2 präsentierten Szenarioannahmen für Elektromobilität. Es wird für das weitere Vorgehen im Forschungsvorhaben OPTUM differenziert für alle betrachteten Größenklassen und alle elektrischen Fahrzeugtypen ermittelt.

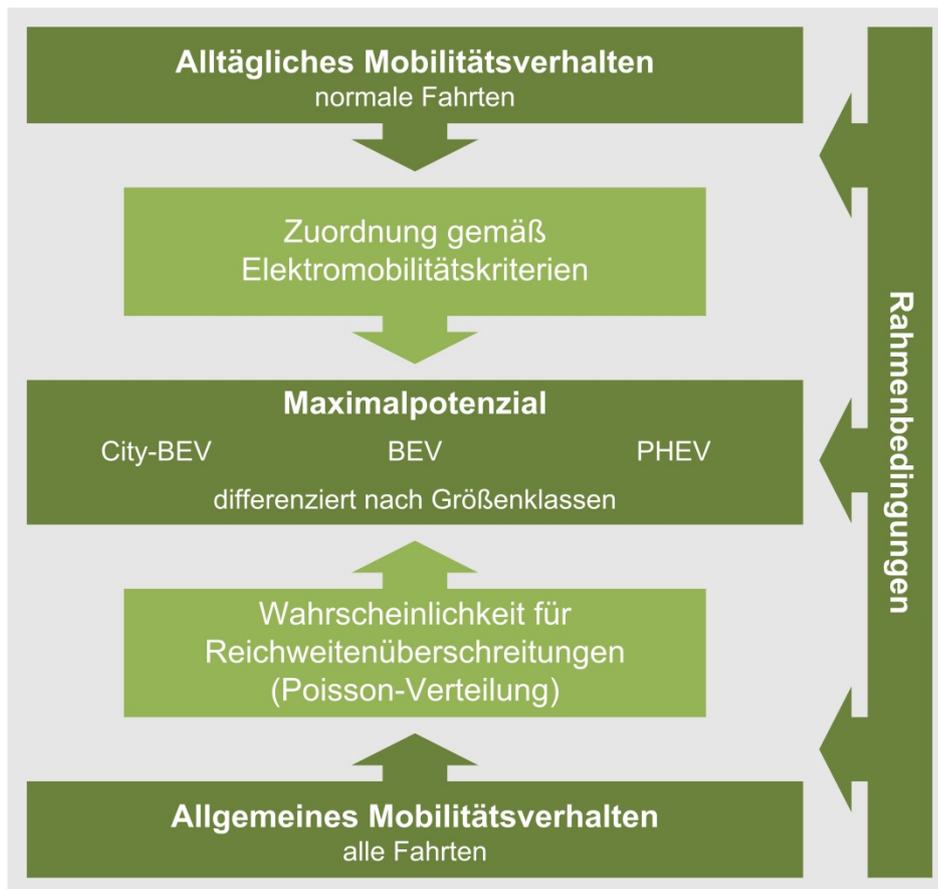


Abbildung 2: Schema zum Vorgehen bei Maximalpotenzialbestimmung

### 3.1.3 Datenaufbereitung

Die Daten der MiD 2008 liegen auf Grund der Übersicht und der Befragungsmethodik in fünf getrennten Datensätzen vor, die über mehrere Identifikationsnummern miteinander verbunden werden können. Dabei sind die für die Betrachtung elementaren Daten der Wegeerhebung eines Stichtags wegen der Befragung aller Personen eines Haushalts auf Personenebene aufgeführt. Da die Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens allerdings nicht auf Personen- oder Fahrtenebene stattfinden soll, wurden Teile dieser Datensätze für die weiteren Betrachtungen im Rahmen von OPTUM zu einem Fahrzeugdatensatz zusammengeführt, in dem alle Fahrten eines Pkw zu einem Pkw-Profil zusammengefasst sind, auch wenn die Fahrten von mehreren Mitgliedern eines Haushalts durchgeführt wurden.

Der Vorteil einer Potenzialabschätzung auf Fahrzeugebene gegenüber Betrachtungen aggregierter Fahrtdaten oder auf der Personenebene liegt darin begründet, dass vor allem für die Berücksichtigung der Nutzungsrestriktionen batterieelektrischer Fahrzeuge das Wissen über alle Standorte und -zeiten, aber auch über alle gefahrenen Distanzen eines Fahrzeugs entscheidend ist. Neben der Umstrukturierung auf die Fahrzeugebene soll in der Analyse des alltäglichen Mobilitätsverhaltens zudem nicht nur die Fahrzeugnutzung eines Tages berücksichtigt werden, sondern das Mobilitätsverhalten einer gesamten Woche mit einfließen, weshalb die erstellten Pkw-Nutzungsprofile einzelner Tage zusätzlich zu Wochennutzungsprofilen zusammengefasst wurden. In allen Schritten dieser Datenumstrukturierung wurden fehlerhafte und irrelevante Daten aus dem Datensatz entfernt, fehlende Daten – wenn möglich – mit plausiblen Annahmen ergänzt, bestehende Daten umkodiert und teilweise neue Variablen gebildet, um für die Potenzialabschätzung und das weitere Vorgehen in OPTUM einen möglichst nützlichen, konsistenten und kompakten Datensatz zu verwenden.

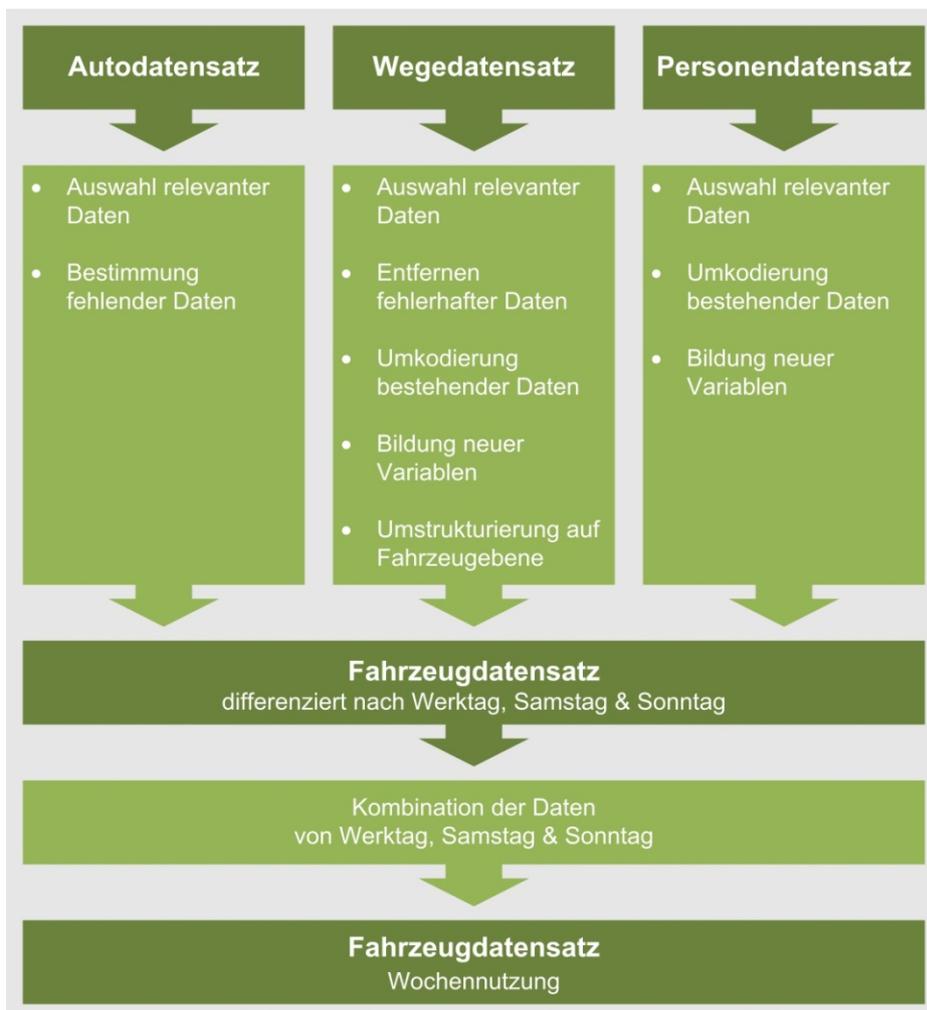


Abbildung 3: Schematische Darstellung zum Vorgehen der Datenaufbereitung der MiD 2008 für die Maximalpotenzialabschätzung und zur Ableitung von Fahrzeugnutzungsprofilen

Der zentrale Datensatz der MiD 2008 zur Bestimmung des Maximalpotenzials ist der Wegedatensatz, in dem rund 193.000 Wege aller im Rahmen der MiD befragten Personen aufgeführt sind. Diese Daten wurden während der Datenaufbereitung um Daten aus dem Auto- und dem Personendatensatz ergänzt (Abbildung 4), um zusätzliche Aussagen zu den erhobenen Pkw und den befragten Haushalten in der Potenzialanalyse machen zu können. Im Folgenden soll dennoch zunächst auf die Datenaufbereitung des Wegedatensatzes eingegangen werden, bevor das Vorgehen bei den anderen beiden Datensätzen erläutert wird. Um in der Potenzialbetrachtung die alltägliche Pkw-Nutzung betrachten zu können, wurde in der Datenaufbereitung zunächst eine Auswahl von für die weitere Analyse notwendigen und relevanten Variablen und Datensatzeinträgen getroffen. Daher wurden alle Wege, die

- » nicht als Fahrer eines zum Haushalt gehörenden Pkw angetreten wurden,
- » als rein berufliche Wege deklariert wurden,
- » nach 24 Uhr des Stichtags gestartet wurden,
- » als Dublette identifiziert wurden,
- » für einen Haushalt angegeben wurden, in dem mindestens ein Weg als „nicht normal“ angegeben wurde,

aus dem Wegedatensatz entfernt. Da die befragten Personen nur einen Einfluss auf die Kaufentscheidung bei einem zum eigenen Haushalt gehörenden Pkw besitzen, werden in der Analyse nur Fahrten mit dem eigenen Pkw betrachtet. Rein berufliche Wege wurden in der MiD 2008 aggregiert abgefragt. Da für diese Fahrten weder Fahrtzeiten aufgenommen wurden, noch bekannt ist, welches Fahrzeug dafür benutzt wurde, können diese Daten nicht für die Potenzialbestimmung verwendet werden und wurden daher aus dem Datensatz entfernt. Bei Dubletten im Datensatz wurde dagegen nur ein Teil des doppelten Eintrags entfernt, so dass diese Fahrten weiterhin in den Daten vorhanden sind.

Für die Entscheidung, ob durch die Angaben der Befragten das alltägliche Mobilitätsverhalten abgebildet werden kann, wurde überprüft, ob alle befragten Haushaltsmitglieder am jeweiligen Stichtag ein „normales“ Mobilitätsverhalten<sup>9</sup> angegeben haben. Gab mindestens ein Haushaltsmitglied in der Befragung an, an dem Stichtag kein „normales“ Mobilitätsverhalten aufgewiesen zu haben, wurden alle Wege dieses Haushalts aus dem neu erstellten Datensatz entfernt und dieser Haushalt somit nicht weiter berücksichtigt, da sich die Pkw-Nutzung aus den Mobilitätsbedürfnissen aller Haushaltsmitglieder ergibt.

Bei der Datenbereinigung von fehlerhaften Daten wurde auf dieselbe Art und Weise vorgegangen und der gesamte Haushalt bei einer fehlerhaften Angabe in der weiteren Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens nicht mehr berücksichtigt. Als fehlerhaft wurden die Daten deklariert, wenn

---

<sup>9</sup> Variable s01 der Datenerhebung MiD 2008: War der Stichtag für Sie persönlich ein normaler Tag?

- » eine zeitliche Überschneidung von Wegen / Fahrten auf Personen- bzw. Fahrzeugebene vorliegt,
- » eine Pkw-Fahrt eine Durchschnittsgeschwindigkeit von mehr als 250 km/h besitzt,
- » eine unplausible Distanz<sup>10</sup> für eine Pkw-Fahrt angegeben wurde,
- » die erste Fahrt des Tag als Rückweg gekennzeichnet wurde,
- » zwei Fahrten in Folge als Zielort „zu Hause“ besitzen,
- » für eine Pkw-Fahrt keine Zuordnung zu einem Pkw angegeben wurde.

Zudem wurden in der Datenaufbereitung einige Variablen umkodiert und zur Bildung neuer Variablen verwendet. Entscheidend für die Abschätzung eines möglichen Einsatzes elektrischer Fahrzeuge sind die Standorte und –zeiten der Pkw. Daher wurden aus den Angaben der Wegezwecke der Standort der Pkw abgeleitet. Dafür wurden, wenn möglich,

- » Rückwege mit einem Wegezweck assoziiert,
- » Hol- und Bringzwecke über Angaben von Mitfahren einem Wegezweck zugeordnet,
- » Wegezwecke in Standorte umkodiert,
- » Fahrten mit einer Standzeit von weniger als 15 Minuten in einer Fahrt zusammengefasst.

Aufgrund der Befragungsmethodik sind einige Wege in der MiD 2008 mit dem Wegezweck „Rückweg“ versehen. Bei der Umkodierung in Standorte wurde diesen Fahrten der Startort der vorigen Fahrt zugeordnet, um den Standort dieser Fahrzeuge ebenfalls in der Analyse berücksichtigen zu können. Zudem wurden Fahrten, zwischen denen das Fahrzeug für weniger als 15 Minuten abgestellt wurde, in einer Fahrt zusammengefasst, da davon ausgegangen wird, dass keine Batterieladung in einer solch kurzen Standzeit durchgeführt wird.

Abschließend wurden im Rahmen der Umstrukturierung auf Fahrzeugebene für die weitere Verwendung in der Analyse unter anderem neue Variablen wie die längste Standzeit des Tages<sup>11</sup>, die Tagesfahrleistung der Pkw und mittlere Gewichtungsfaktoren gebildet.

Im Autodatensatz finden sich Angaben zu den Pkw der Haushalte, die im Rahmen der MiD 2008 befragt wurden. Entscheidende Größen des Autodatensatzes sind für die weitere Betrachtung unter anderem die angegebenen Größenklassen der Fahrzeuge, die Verfügbarkeit eines Pkw-Stellplatzes auf dem eigenen Grundstück und die Jahresfahrleistung der Pkw.

---

<sup>10</sup> In der Datenerhebung sind Pkw-Fahrten mit einer Distanz von mehr als 1.000 km als unplausibel gekennzeichnet. Zudem wurden in der Datenaufbereitung Fahrten mit einer Distanz von 0 km als unplausibel deklariert.

<sup>11</sup> inkl. Standort der längsten Standzeit während des Tages

Das KBA-Segment der Fahrzeuge ist ein entscheidendes Kriterium in der Potenzialbetrachtung für Elektrofahrzeuge. Daher wurde, wenn für die Fahrzeuge keine Angabe der Größenklasse gemacht wurde, die Größenklasse über die Leistungsangabe der Fahrzeuge abgeleitet. Ist im Autodatensatz ebenfalls keine Leistungsangabe hinterlegt, wurde für die Ableitung der Größenklasse bei Besitz von mehreren Fahrzeugen die Größenklasse der anderen Fahrzeuge des Haushalts<sup>12</sup> und bei nur einem Fahrzeug im Haushalt der ökonomische Status des Haushalts<sup>13</sup> als Zuordnungskriterium herangezogen. Dieses Vorgehen musste allerdings nur für wenige Pkw gewählt werden.

Ein weiteres Merkmal mit fehlenden Angaben bei einigen Fahrzeugen ist die Jahresfahrleistung. Da die Jahresfahrleistung stark mit dem Baujahr und dem Antriebstyp korreliert, wurden die fehlenden Werte der Jahresfahrleistung über für das Baujahr und den Antriebstyp gemittelte Durchschnittswerte bestimmt. Für die Mittelwertbestimmung bei Fahrzeugen der Baujahre vor 1990 wurden mehrerer Baujahre zusammengezogen. Abschließend wurden die im Autodatensatz aufgeführten Daten mit dem aus dem Wegedatensatz erstellten Fahrzeugdatensatz, der das alltägliche Mobilitätsverhalten abbildet, zusammengeführt.

Tabelle 1: Zuordnungskriterien bei fehlender Angabe des KBA-Segments

| Leistung [kW]          | KBA-Segmente       |
|------------------------|--------------------|
| < 50                   | Mini               |
| 50 - 75l               | Kleinwagen         |
| 75 – 120               | Kompaktklasse      |
| 120 – 170 <sup>a</sup> | Mittelklasse       |
| > 170 <sup>a</sup>     | Obere Mittelklasse |

<sup>a</sup> Bei Dieselfahrzeugen wurde für die Abgrenzung zwischen Mittelklasse und Oberer Mittelklasse der Leistungswert 150 kW definiert.

Um in der Betrachtung der Fahrzeugnutzung soziodemographische Daten und Einstellungen der Haushalte zur Mobilität mit berücksichtigen zu können, wurden zudem Daten aus dem Personendatensatz dem bereits erstellten Datensatz des alltäglichen Mobilitätsverhaltens hinzugefügt.

Dieser neue Datensatz stellt bis zu diesem Stand der Datenaufbereitung allerdings nur das alltägliche Mobilitätsverhalten auf Tagesebene dar, da jeder in der MiD befragte Haushalt nur an einem Stichtag detaillierte Angaben zu seinem Mobilitätsverhalten gemacht hat. Hinsichtlich der besonderen Restriktionen beim Einsatz von elektrischen Fahrzeugen ist im Hinblick auf die

<sup>12</sup> Besitzt der Haushalt ein anderes Fahrzeug der Größenklassen Sportwagen, Oberklasse, Obere Mittelklasse wird das Fahrzeug ohne Angabe des KBA-Segments der Mittelklasse zugeordnet. In allen restlichen Fällen wird der Pkw ohne Angabe des KBA-Segments als Kleinwagen deklariert.

<sup>13</sup> Ökonomischer Status sehr hoch → KBA-Segment: Obere Mittelklasse; Ökonomischer Status hoch → KBA-Segment: Mittelklasse; Ökonomischer Status mittel → KBA-Segment: Kompaktklasse; Ökonomischer Status niedrig, sehr niedrig → KBA-Segment: Kleinwagen

Abschätzung des Maximalpotenzials eine Betrachtung eines längeren Zeitraums hilfreich. Zudem unterscheidet sich die Fahrzeugnutzung am Wochenende erheblich von der während der Werktage, so dass entschieden wurde, die Potenzialbetrachtung auf Wochenebene durchzuführen.

Somit wurde ein weiterer Schritt in der Datenaufbereitung notwendig, um aus der Betrachtung auf Tagesebene<sup>14</sup> Wochennutzungsprofile von Fahrzeugen für das alltägliche Mobilitätsverhalten zu erhalten. Die einzelnen Datensätze der Fahrzeuge wurden unter der Berücksichtigung der Parameter

- » Haushaltstyp
- » KBA-Segment
- » Jahresfahrleistung
- » Anzahl der Fahrzeuge im Haushalt
- » Kreistyp<sup>15</sup>

zufällig zu Wochennutzungsprofilen miteinander verbunden. Da bei der Verknüpfung der Datensätze nicht in allen Fällen eine Übereinstimmung für alle aufgeführten Parameter vorlag, wurden teilweise nur einige übereinstimmende Parameter für die Verknüpfung der Datensätze vorausgesetzt. Dabei entspricht die Priorität der Parameter bei der Verknüpfung der Reihenfolge der Auflistung, d.h. zumindest der Haushaltstyp stimmt bei den zu einem Wochenprofil zusammengeführten Datensätzen überein.

Durch dieses Vorgehen wurden Datensätze einzelner Fahrzeuge am Wochenende mehrfach in verschiedene Wochennutzungsprofile übernommen, da für die Kombination der Datensätze mehr Nutzungsprofile an Werktagen vorlagen als für die Wochenendtage. Da die einzelnen Datensätze für die Fahrzeugnutzung am Wochenende eine repräsentative Darstellung der Pkw-Nutzung am Wochenende sind, entsteht dadurch allerdings keine gravierende Verzerrung der Daten. Zudem wurden diesen Wochennutzungsprofilen alle Fahrzeugeigenschaften und soziodemographischen Daten der Datensätze der an Werktag befragten Haushalte zugesprochen, um eine repräsentative Darstellung dieser Werte beizubehalten.

#### **3.1.4 Methodisches Vorgehen**

Für die Ableitung des Maximalpotenzials wird ein zweistufiges Verfahren angewendet (siehe Abschnitt 3.1.2), in dem das alltägliche Mobilitätsverhalten und unregelmäßig vorkommende Fahrten, die über der Reichweite von batterieelektrischen Pkw liegen, getrennt voneinander berücksichtigt werden. Zur Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens dient der im vorigen Abschnitt vorgestellte Datensatz mit Wochennutzungsprofilen als Grundlage. Als Voraussetzung der Ableitung des Maximalpotenzials wird angenommen, dass sich die Mobilitätsbedürfnisse und somit das Mobilitätsverhalten in Zukunft nicht verändern, so dass unter Berücksichtigung der angenommenen Rahmenbedingungen anhand der Kriterien

---

<sup>14</sup> differenziert nach Werktag, Samstag und Sonntag

<sup>15</sup> Charakterisierung des Wohnortes des befragten Haushalts nach Raumtyp und Bevölkerungsdichte

- » KBA-Segment,
- » Tagesfahrleistung,
- » Standzeiten und -orte

für jedes einzelne mit einem Wochennutzungsprofil hinterlegte Fahrzeug das Potenzial für die Nutzung elektrischer Fahrzeuge bestimmt werden kann. Die hier aufgezeigten Kriterien für die Potenzialbestimmung stellen allerdings nur für batterieelektrische Fahrzeuge eine Restriktion dar, da Plug-In-Hybrid-Pkw gemäß den Szenarioannahmen in allen Größenklassen zur Verfügung stehen werden und bezüglich der Reichweite und der Betankung im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen keine weitreichenden Beschränkungen auftreten. Für die Potenzialbetrachtung für batterieelektrische Pkw ist zudem noch erwähnenswert, dass die maximale, zulässige Tagesfahrleistung über der nutzbaren Reichweite eines batterieelektrischen Pkw liegen kann, wenn bei der Fahrzeugnutzung genügend lange Standzeiten an Standorten mit einer Lademöglichkeit hinterlegt sind.

Im zweiten Schritt der Potenzialmodellierung wird der Tatsache Rechnung getragen, dass Pkw neben ihrem alltäglichen Einsatz auch für Fahrten eingesetzt werden, die nicht in regelmäßigen Abständen anfallen und somit in der Befragung als „nicht normal“ deklariert wurden. Darunter fallen auch lange Fahrten, die bei Überschreitung der maximalen Reichweite eine weitere Restriktion für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen darstellen. Für die Betrachtung dieser Restriktion für die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge wird daher nicht der erstellte Datensatz des alltäglichen Mobilitätsverhaltens als Datenbasis verwendet. Vielmehr werden alle in der MiD 2008 aufgeführten Pkw-Fahrten für die Betrachtung von langen Fahrten berücksichtigt. Zu erwähnen ist auch, dass sich für Plug-In-Hybridfahrzeuge an dieser Stelle keine Restriktion ergibt.

Da das Mobilitätsverhalten in der MiD 2008 – wie bereits erwähnt - nur für jeweils einen Stichtag vorliegt, wird die Problematik der Reichweitenüberschreitungen im Mobilitätsverhalten mit Hilfe der Poisson-Verteilung behandelt (Gleichung 1).

$$P_{\lambda}(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} * e^{-\lambda} \quad (1)$$

Die Poisson-Verteilung ist eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung für unabhängig voneinander auftretende Ereignisse mit zwei Ergebnissen („Erfolg“ und „Misserfolg“). Im betrachteten Fall ist das betrachtete Ereignis  $k$  die Häufigkeit einer Fahrt über der angenommenen Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs während eines Jahres („Erfolg“). Somit kann bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $P$  für die betrachteten Fahrzeuge  $k$  Reichweitenüberschreitungen im Jahr auftreten.

Einzigster Parameter der Poisson-Verteilung ist dabei der Erwartungswert  $\lambda$  der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dieser Erwartungswert entspricht in Gleichung 1 dem Jahresdurchschnitt an Fahrten über der Reichweitengrenze der batterieelektrischen Pkw und wurde auf Basis aller in der MiD 2008 aufgeführten Fahrten bestimmt ( $\lambda_{BEV} = 13,50$  Reichweitenüberschreitung pro Jahr). Da über die einzeln aufgeführten Fahrten der

Stichtagsbefragung nicht die angegebenen Werte der Jahresfahrleistung darstellbar sind<sup>16</sup>, ist davon auszugehen, dass speziell lange Fahrten in der MiD 2008 untererfasst sind. Daher wurde für die Bestimmung von  $\lambda$  die über die an dem jeweiligen Stichtag zurückgelegten Einzelfahrten bestimmte Jahresfahrleistung mit der durchschnittlich von den Befragten angegebenen Fahrleistung verglichen und annahmenbasiert<sup>17</sup> die Zahl der fehlenden langen Fahrten abgeschätzt.

Um die Ergebnisse der Poisson-Verteilung für die Ableitung des Maximalpotenzials verwenden zu können, muss eine Annahme dafür getroffen werden, wie viele Nutzungskonflikte aufgrund von Reichweitenüberschreitungen von Besitzern batterieelektrischer Fahrzeuge akzeptiert werden. In dem hier betrachteten Szenario wird angenommen, dass die Besitzer batterieelektrischer Fahrzeuge nicht mehr als acht Nutzungskonflikte aufgrund von Reichweitenüberschreitungen akzeptieren würden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der maximal acht Nutzungskonflikte auftreten, stellt somit die Obergrenze für die Bestimmung des Maximalpotenzials von batterieelektrischen Pkw dar.

Unter der Berücksichtigung der maximal nutzbaren Reichweite batterieelektrischer Pkw<sup>18</sup> wird mit Hilfe der Poisson-Verteilung für batterieelektrische Pkw (BEV) die Wahrscheinlichkeit für maximal acht Nutzungskonflikte auf 13,5 % abgeschätzt. Für batterieelektrische Stadtfahrzeuge (City-BEV) liegt diese Wahrscheinlichkeit unter 1 %, so dass für die Abschätzung des Maximalpotenzials von batterieelektrischen Stadtfahrzeugen im weiteren Vorgehen die Annahme getroffen wird, dass mindestens ein weiterer, mit einem konventionellen Motor ausgestatteter Pkw ohne Reichweitenbeschränkung im selben Haushalt vorhanden sein muss, um einem Datensatz in der Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens das Potenzial für ein batterieelektrisches Fahrzeug zuzusprechen. Eine Restriktion aufgrund langer, unregelmäßiger Fahrten wird bei batterieelektrischen Stadt-Pkw dementsprechend nicht mehr berücksichtigt

Eine weitere Restriktion in der Bestimmung des Maximalpotenzials elektrischer Fahrzeuge stellt die regelmäßige Verfügbarkeit einer Ladestation dar. Da es unwahrscheinlich ist, ein Plug-In-Hybrid-Fahrzeug ohne regelmäßige Verfügbarkeit einer Ladestation zu nutzen, wird das Maximalpotenzial von Plug-In-Hybridfahrzeugen alleine durch diese Restriktion begrenzt.

Haben Pkw-Besitzer die Möglichkeit ihr Fahrzeug auf dem eigenen Grundstück abzustellen, ist davon auszugehen, dass sie bei Interesse an einem Elektrofahrzeug die Möglichkeit nutzen, dieses Fahrzeug während ihres Aufenthalts zuhause aufzuladen. Somit werden in der MiD vorkommende Haushalte mit einem Stellplatz auf dem eigenen Grundstück bei der Ableitung des Maximalpotenzials zumindest nicht durch die Verfügbarkeit eines Ladeplatzes eingeschränkt.

---

<sup>16</sup> Über die durchschnittliche Tagesfahrleistung der Pkw an Werktagen, am Samstag und am Sonntag lässt sich anhand der Stichtagsbefragung eine Jahresfahrleistung von 10.100 km ableiten. Die Teilnehmer der MiD gaben in der Datenerhebung im Durchschnitt allerdings eine Jahresfahrleistung von 13.670 km an.

<sup>17</sup> Für die Ableitung der Zahl an fehlenden, langen Fahrten wurde die durchschnittliche Länge von Fahrten der Kategorien 250 km - 500 km, 500 km - 750 km und > 750 km bestimmt. Fahrten dieser drei Kategorien wurden jeweils mit Hin- und Rückfahrt in der Reihenfolge von kurzen zu langen Fahrten solange zu der über die Stichtagsbefragung ermittelte Jahresfahrleistung hinzugefügt, bis der von den Befragten angegebene Wert von 13.670 km erreicht wird.

<sup>18</sup> Maximal nutzbare Reichweite : 75 km (City-BEV) / 124 km (BEV)

Für Fahrzeuge von Haushalten ohne eigenen Stellplatz besteht jedoch eine Beschränkung, da diese bei Erwerb eines elektrischen Fahrzeugs von der Infrastruktur im (semi-)öffentlichen Raum abhängig sind. Daher wird durch die Szenarioannahmen eine Obergrenze für das Maximalpotenzial von Haushalten festgelegt, die keine Möglichkeit besitzen, einen Pkw auf dem eigenen Grundstück abzustellen<sup>19</sup>.

### 3.1.5 Bestimmung des Maximalpotenzials

Das im vorigen Abschnitt vorgestellte Vorgehen zur Bestimmung des Maximalpotenzials wird größenklassenspezifisch auf die Daten der MiD 2008 angewendet, um somit die Unterschiede der Fahrzeugsegmente in der Modellierung berücksichtigen zu können. Diese Einteilung in unterschiedliche Größenklassen (Tabelle 2) wird in allen Teilschritten zur Bestimmung der Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen beibehalten, womit eine Konsistenz im Vorgehen erreicht wird. Aus diesem Grund ist das mit den im Szenario angenommenen Rahmenbedingungen ermittelte Maximalpotenzial für das Jahr 2030 in Abbildung 4 nach Größenklassen differenziert dargestellt. Da sich für das Jahr 2020 ein ähnliches Maximalpotenzial und eine ähnliche Struktur in Bezug auf die Größenklassen wie für das Jahr 2030 ergeben, ist das Maximalpotenzial für das Jahr 2020 nicht in diesem Detailgrad aufgeführt. Der Vergleich zwischen dem Maximalpotenzial der Jahre 2020 und 2030 auf der Ebene aller Fahrzeuge ist allerdings in Abbildung 5 zu finden.

Tabelle 2: Einteilung von Fahrzeugsegmenten in Größenklassen

| Größenklassen | KBA-Segmente   |
|---------------|--|
| klein         | Mini, Kleinwagen   |
| mittel        | Kompaktklasse, VANs, Utilities                             |
| groß          | Mittelklasse, Obere Mittelklasse, Oberklasse, Geländewagen |

In Abbildung 4 lassen sich die unterschiedlichen Restriktionen für die einzelnen Typen an betrachteten elektrischen Pkw gut erkennen. Für alle Typen an elektrischen Pkw gilt, dass das alltägliche Mobilitätsverhalten nur eine unwesentliche Restriktion für die Nutzung von elektrischen Fahrzeugen darstellt. Selbst bei der Betrachtung von batterieelektrischen Stadtfahrzeugen ist die eingeschränkte Reichweite in der alltäglichen Pkw-Nutzung nur für einen kleinen Teil der Fahrzeuge problematisch. Eine bedeutende Restriktion für das Maximalpotenzial elektrischer Fahrzeuge ist gemäß den Szenarioannahmen die Verfügbarkeit der Fahrzeuge in den verschiedenen Größenklassen. Batterieelektrische Pkw (BEV) sind nur in den kleinen Fahrzeugsegmenten bis zur Kompaktklasse, batterieelektrische Stadtfahrzeuge sogar nur in dem Fahrzeugsegment Mini verfügbar, so dass das Maximalpotenzial aufgrund der Pkw-Bestandsstruktur für diese Arten an elektrischen Fahrzeugen stark eingeschränkt ist. In Abbildung 4 ist dabei zu beachten, dass in der Größenklasse „mittel“ auch Fahrzeuge

<sup>19</sup> Maximal 30 % (2020) bzw. 50 % (2030) der Haushalte ohne eigenen Stellplatz können ein Elektrofahrzeug besitzen.

hinterlegt sind, die gemäß den Szenarioannahmen aufgrund ihres Fahrzeugsegments nicht als potenzielle batterieelektrische Pkw deklariert werden.

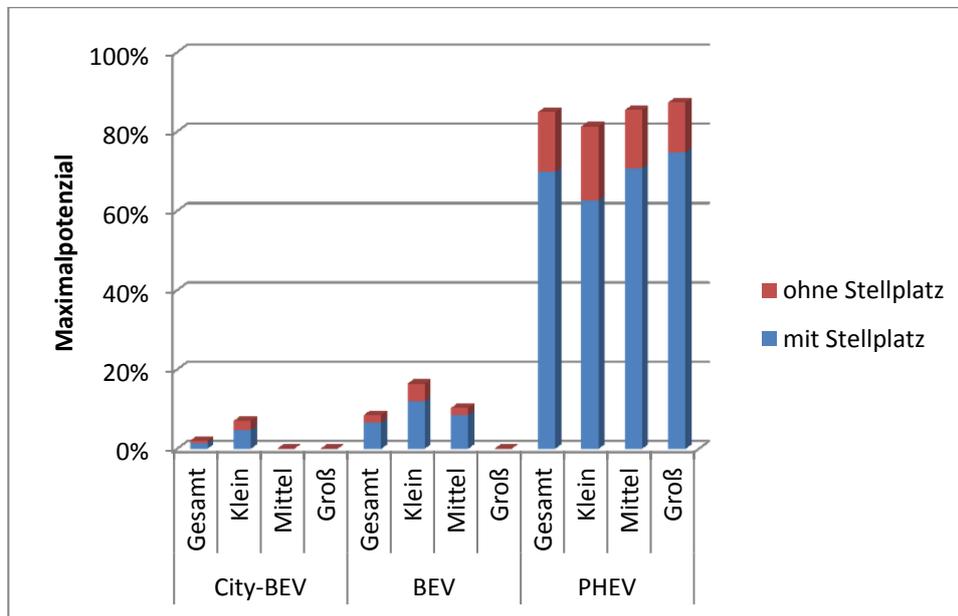


Abbildung 4: Maximalpotenzial für elektrische Pkw im Jahr 2030 - differenziert nach Größenklassen

Eine zweite entscheidende Restriktion für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen stellt die Betrachtung des allgemeinen Mobilitätsverhalten dar, in dem unter anderem unregelmäßig vorkommende Fahrten über der Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge in der Potenzialanalyse berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen nutzbaren Reichweite von batterieelektrischen Stadtfahrzeugen wurde bei dieser Betrachtung für diese Art an elektrischen Fahrzeugen vorausgesetzt, dass ein zweites, mit einem Verbrennungsmotor ausgestattetes Fahrzeug im Haushalt vorhanden ist. Durch die geringe Wahrscheinlichkeit von acht oder weniger durch die eingeschränkte Reichweite ausgelösten Nutzungskonflikten ist diese Restriktion neben der Verfügbarkeit in nur einigen Fahrzeugsegmenten die entscheidende Restriktion für das geringe Maximalpotenzial an batterieelektrischen Pkw.

Für batterieelektrische Pkw ist die regelmäßige Verfügbarkeit an Ladestationen mit der vorgestellten Methodik keine bedeutende Restriktion, da die Obergrenze des Maximalpotenzials bereits durch die Betrachtung der unregelmäßig vorkommenden, langen Fahrten gegeben ist. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge ist diese Begrenzung allerdings die einzige Restriktion in der Betrachtung, da sich die Nutzungsmöglichkeiten eines Plug-In-Hybrid-Pkw in Bezug auf das alltägliche Mobilitätsverhalten und unregelmäßig lange Fahrten nicht von denen eines konventionellen Pkw unterscheiden. Das unterschiedliche Potenzial zwischen den Größenklassen ist davon geprägt, dass die in der MiD befragten Haushalte mit kleineren Fahrzeugen im Durchschnitt seltener einen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück besitzen als solche mit großen Fahrzeugen und sich somit bei kleineren Fahrzeugen die Beschränkung der Ladestationen im (semi-)öffentlichen Raum stärker auswirkt.

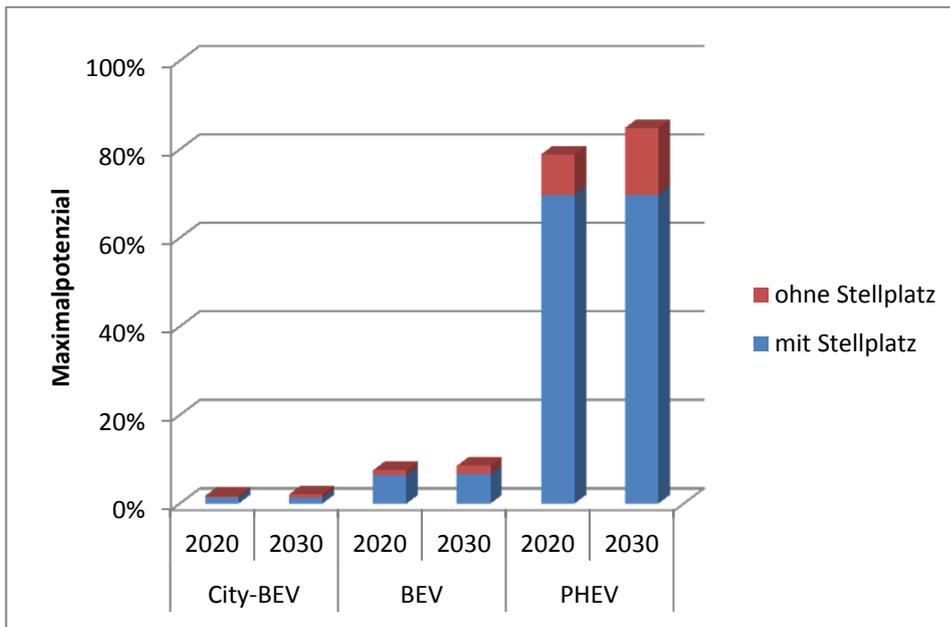


Abbildung 5: Maximalpotenzial für elektrische Fahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030

Beim Vergleich des Maximalpotenzials der Jahre 2020 und 2030 (Abbildung 5) ergeben sich nur geringe Unterschiede für batterieelektrische Pkw. Da das alltägliche Mobilitätsverhalten bei den Szenarioannahmen für das Jahr 2020 keine starke Einschränkung für die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge darstellt, ergibt sich durch die Annahme schnellerer Ladevorgänge im Jahr 2030 keine wesentliche Steigerung des Maximalpotenzials für die Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens. Die Szenarioannahmen für die Berücksichtigung von Fahrten über der Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge ändern sich nicht zwischen 2020 und 2030, so dass aus diesem Grund keine Steigerung des Maximalpotenzials im Jahr 2030 zu erwarten ist.

Der entscheidende Faktor für den geringen Anstieg des Maximalpotenzials im Jahr 2030 ist daher die stärkere Verbreitung (semi-)öffentlicher Infrastruktur, so dass für einen Teil der Haushalte ohne Pkw-Stellplatz auf dem eigenen Grundstück die Möglichkeit besteht, elektrische Pkw zu nutzen. Erkennbar ist dies vor allem bei der Betrachtung von Plug-In-Hybridfahrzeugen, bei denen die regelmäßige Verfügbarkeit von Ladeoptionen die einzige Begrenzung des Maximalpotenzials darstellt.

### 3.1.6 Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen stellen eine Möglichkeit dar, die Wirkung einzelner Parameter auf die Ergebnisse eines Modells zu analysieren. Bei der Betrachtung des Maximalpotenzials wurde deutlich, dass das alltägliche Mobilitätsverhalten der meisten Haushalte mit elektrischen Fahrzeugen problemlos bewältigt werden kann. Da davon auszugehen ist, dass der Effekt von Einflussgrößen, die in die Untersuchung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens eingehen, bei realistischen Variationen gering ist, wird auf eine Sensitivitätsuntersuchung des Maximalpotenzials in Bezug auf das alltägliche Mobilitätsverhalten verzichtet.

Eine entscheidende Größe für die Bestimmung des Maximalpotenzials ist die Untersuchung der Häufigkeit von unregelmäßig vorkommenden Fahrten über der Reichweite batterieelektrischer Pkw. Da diese Fahrten keinen Einfluss auf das Maximalpotenzial von Plug-In-Hybridfahrzeugen haben und für den Einsatz eines batterieelektrischen Stadtfahrzeugs ein zweiter, mit einem Verbrennungsmotor ausgestatteter Pkw im Haushalt vorausgesetzt wird, wird die Sensitivität dieser Größe alleine für batterieelektrische Pkw untersucht.

In den Rahmenbedingungen des untersuchten Marktszenarios wird von einer maximal nutzbaren Reichweite batterieelektrischer Pkw von 124 km ausgegangen. Zudem wird die Annahme getroffen, dass Besitzer solcher Fahrzeuge maximal acht Mal im Jahr akzeptieren, dass die Reichweite des batterieelektrischen Fahrzeugs zu gering für die angestrebte Fahrt ist und sie ein alternatives Verkehrsmittel für diese Fahrt benutzen oder möglicherweise an Schnellladestationen zwischenladen müssen. Diese beiden Einflussgrößen für die Untersuchung von unregelmäßig vorkommenden langen Fahrten werden in der folgenden Sensitivitätsanalyse variiert.

In der Sensitivität „Reichweite (-)“ wird von einer maximal nutzbaren Reichweite von nur 100 km ausgegangen, wogegen die Reichweite in der Sensitivitätsbetrachtung „Reichweite (+)“ auf 250 km erhöht wird. Zu erwähnen ist dabei, dass die Reichweite dabei nur für die Betrachtung der langen Fahrten variiert wird und somit mit Bezug auf die Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens kein konsistentes Szenario mehr vorliegt<sup>20</sup>. Als zweite Größe wird die Akzeptanz von Reichweitenüberschreitungen verändert. Dies könnte ein Szenario mit einer hohen Verbreitung an Schnellladesäulen oder mit einer verstärkten Vernetzung von Verkehrsträgern entsprechen, in denen Fahrten über der Reichweite batterieelektrischer Pkw häufiger ohne bedeutenden Mehraufwand bewältigt werden können.

Das Potenzial für batterieelektrische Pkw sinkt selbst bei einer geringen Reduzierung der maximal nutzbaren Reichweite („Sensitivität (-)“) erheblich ab. Dies hängt damit zusammen, dass die für diese Reichweite ermittelte Wahrscheinlichkeit von maximal acht Reichweitenüberschreitungen pro Jahr auf 4 % absinkt. Bei einer Reichweite von 250 km („Reichweite (+)“) erhöht sich dieser Wert bereits auf 59 %, womit die in Abbildung 6 dargestellte Steigerung des Maximalpotenzials batterieelektrischer Pkw zu erklären ist. Noch höher ist das Maximalpotenzial, wenn batterieelektrische Pkw zwar die im Marktszenario angenommene Reichweite besitzen, die Pkw-Nutzer aber mehr Nutzungskonflikte akzeptieren. In diesem Fall wird das Maximalpotenzial auch nicht mehr alleine durch die Betrachtung unregelmäßig vorkommender, langer Fahrten begrenzt, sondern auch durch die begrenzte Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten für Pkw-Besitzer ohne Stellplatz auf dem eigenen Grundstück.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass sich in der betrachteten Sensitivitätsanalyse nur das Maximalpotenzial batterieelektrischer Pkw verändert. Plug-In-Hybridfahrzeuge können dieselben Mobilitätsbedürfnisse wie konventionelle Pkw befriedigen, bedürfen dabei allerdings der regelmäßigen Verfügbarkeit von Ladestationen. Somit hängt das Maximalpotenzial für diesen Typ an Elektrofahrzeug alleine von der Verbreitung der Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum ab.

---

<sup>20</sup> Die Reichweitenänderung müsste selbstverständlich auch in der Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens berücksichtigt werden. Zudem würden sich bei einer größeren Batterie der Energieverbrauch der Fahrzeuge sowie die Ladedauer der Batterien verändern.

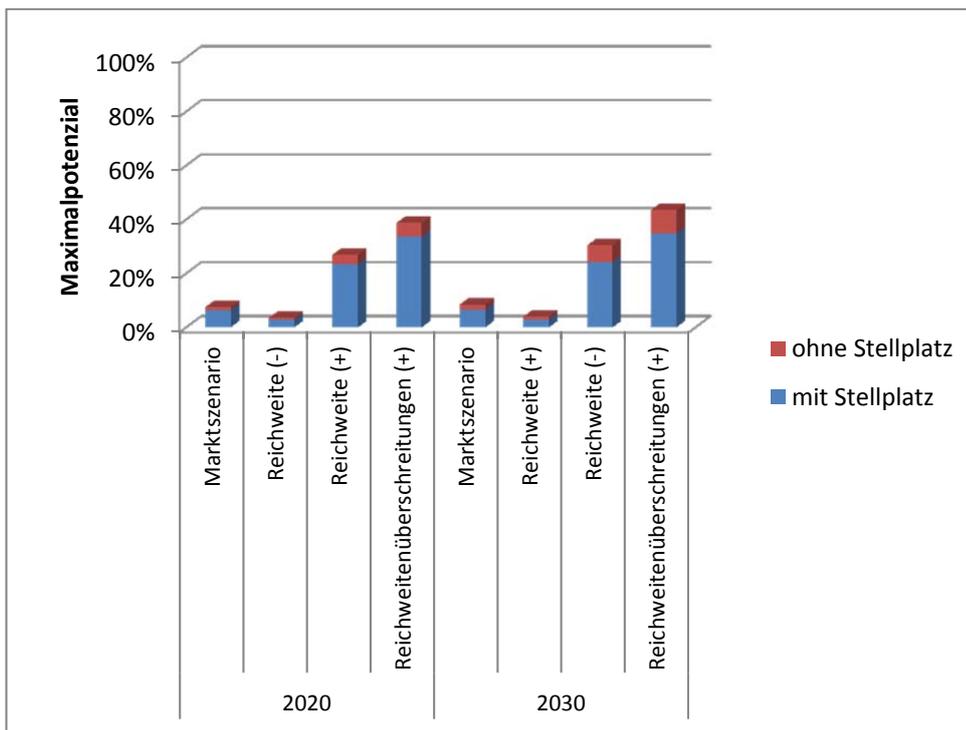


Abbildung 6: Sensitivitätsbetrachtung des Maximalpotenzials batterieelektrischer Pkw

### 3.2 Akzeptanzbetrachtung

Neben dem theoretischen Substitutionspotenzial von konventionellen Pkw, welches durch das im vorigen Kapitel präsentierte Maximalpotenzial für elektrische Pkw beschrieben ist, dient die Akzeptanz für elektrische Pkw als zweite bedeutende Größe für die Ableitung der Marktentwicklung von elektrischen Fahrzeugen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens OPTUM wurde vom Institut für sozial-ökologische Forschung daher eine Befragung von rund 1.500 potenziellen Neuwagenkäufern durchgeführt, um die Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge ableiten zu können. Dafür wurde in einer Conjoint-Analyse eine Kaufentscheidung zwischen jeweils drei Pkw simuliert, in der neben konventionellen Pkw auch Plug-In-Hybridfahrzeuge und batterieelektrische Pkw abgebildet wurden.

Bei der Analyse der von den Befragten getroffenen Entscheidungen in der Kaufsimulation wurde die Bedeutung gewisser Pkw-Eigenschaften und deren Ausprägungen untersucht, um dadurch die Akzeptanz für die unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung der in den Rahmenbedingungen festgelegten Annahmen abzuleiten. Diese Analyse wurde genauso wie die Bestimmung des Maximalpotenzials größenklassenspezifisch durchgeführt (Tabelle 3), wobei eine detaillierte Erläuterung des Vorgehens und der Ergebnisse in [3] gegeben ist.

In der Akzeptanzanalyse wurde zudem zwischen Personen mit und ohne Pkw-Stellplatz auf dem eigenen Grundstück unterschieden, da dieser Parameter in der Modellierung des Maximalpotenzials als ein entscheidender Faktor für die regelmäßige Verfügbarkeit einer Ladestation herangezogen wurde und sich die Akzeptanz in Hinblick auf diese Eigenschaft unterscheidet. Eine weitere Differenzierung zwischen Pkw der Segmente „Mini“ und

„Kleinwagen“ wurde in der Größenklasse „klein“ gemacht, um in dieser Größenklasse sowohl die Kaufentscheidung für City-BEV als auch für BEV simulieren zu können.

Tabelle 3: Akzeptanz für elektrische Fahrzeuge

| Größenklasse      |                 | Akzeptanz (2020 / 2030) [%] |             |             |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|-------------|-------------|
|                   |                 | CV                          | PHEV        | BEV         |
| Mini <sup>a</sup> | mit Stellplatz  | 43,9 / 40,4                 | 36,8 / 41,4 | 19,3 / 18,2 |
|                   | ohne Stellplatz | 32,1 / 40,2                 | 35,8 / 39,9 | 32,1 / 30,1 |
|                   | gesamt          | 38,4 / 35,5                 | 36,3 / 40,7 | 25,3 / 23,8 |
| Kleinwagen        | mit Stellplatz  | 45,9 / 40,2                 | 40,1 / 42,7 | 14,0 / 17,1 |
|                   | ohne Stellplatz | 34,2 / 30,3                 | 41,7 / 41,4 | 24,1 / 28,3 |
|                   | gesamt          | 40,4 / 35,6                 | 40,8 / 42,1 | 18,8 / 22,3 |
| mittel            | mit Stellplatz  | 42,2 / 38,3                 | 48,8 / 47,0 | 9,0 / 14,7  |
|                   | ohne Stellplatz | 39,2 / 36,0                 | 44,6 / 39,1 | 16,2 / 24,9 |
|                   | gesamt          | 40,8 / 37,3                 | 47,0 / 43,5 | 12,2 / 19,2 |
| groß              | mit Stellplatz  | 41,4 / 38,4                 | 58,6 / 61,6 | - / -       |
|                   | ohne Stellplatz | 35,5 / 32,3                 | 64,5 / 67,7 | - / -       |
|                   | gesamt          | 40,0 / 36,9                 | 60,0 / 63,1 | - / -       |

<sup>a</sup> Die Eigenschaften des batterieelektrischen Pkw entsprechen denen eines batterieelektrischen

### 3.3 Marktpotenzial Elektromobilität

Für die Bestimmung der Marktentwicklung werden das theoretische Maximalpotenzial und die Ergebnisse der Akzeptanzanalyse miteinander kombiniert, um einerseits die Mobilitätsbedürfnisse bzw. das Mobilitätsverhalten und andererseits die Einstellung in Bezug auf Elektromobilität in der Ableitung der Marktentwicklung zu berücksichtigen. Aus der Verknüpfung dieser beiden Betrachtungen ergibt sich das Marktpotenzial, womit die theoretische Obergrenze für die Marktentwicklung elektrischer Pkw dargestellt wird, da in der Betrachtung des Marktpotenzials der Aspekt der tatsächlichen Angebotsentwicklung von Elektrofahrzeugen zunächst nicht berücksichtigt wird. Für beide bisher angestellten Betrachtungen ist zudem angenommen, dass sie sich aus heutigen Analysen ableiten lassen und sich weder die Mobilitätsbedürfnisse noch die Einstellung zu Elektromobilität ändern.

#### 3.3.1 Methodisches Vorgehen

In der Bestimmung des Marktpotenzials geht die Limitierung der Zahl an elektrischen Fahrzeugen durch das Maximalpotenzial und durch die Akzeptanzanalyse gleichwertig ein. Größenklassenspezifisch und nach Haushalten mit und ohne Stellplatz auf dem eigenen Grundstück differenziert bestimmt der geringere Wert von Maximalpotenzial und Akzeptanz die

Höhe des Marktpotenzials. Es wird allerdings so vorgegangen, dass, wenn die Akzeptanz für ein batterieelektrisches Fahrzeug das Maximalpotenzial übersteigt, diese „verlorene“ Akzeptanz für batterieelektrische Fahrzeuge auf die Akzeptanz für Plug-In-Hybridfahrzeuge aufgeschlagen wird.

Erwähnenswert ist dabei das Vorgehen in der Größenklasse „klein“, da in dieser Größenklasse neben dem Marktpotenzial batterieelektrischer Pkw (BEV) auch batterieelektrische Stadtfahrzeuge (City-BEV) betrachtet werden. In der Kaufsimulation der Akzeptanzanalyse wurden konventionelle und Plug-In-Hybridfahrzeuge des Mini-Segments mit einem batterieelektrischen Stadtfahrzeug verglichen, so dass zur Ableitung des Marktpotenzials von batterieelektrischen Stadtfahrzeugen die Maximalpotenzial- und Akzeptanzwerte des Segments „Mini“ verwendet werden. Das Marktpotenzial batterieelektrischer Pkw wird dagegen über das Segment „Kleinwagen“ bestimmt. Um zu berücksichtigen, dass im Segment „Mini“ ebenfalls Pkw mit den Eigenschaften batterieelektrischer Pkw angeboten werden, wird das auf diese Weise ermittelte Marktpotenzial gemäß der Bestandsstruktur auf die Segmente „Mini“ und „Kleinwagen“ aufgeteilt<sup>21</sup>.

### 3.3.2 Bestimmung des Marktpotenzials

An dieser Stelle wird auf die Ergebnisse der Bestimmung des Marktpotenzials elektrischer Fahrzeuge eingegangen. Dabei wird auf eine Darstellung mit einer Differenzierung nach Größenklassen der Übersicht halber verzichtet. In Abbildung 7: Marktpotenzial elektrischer Fahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030 (SP: Stellplatz) ist ein Vergleich des Marktpotenzials in den Jahren 2020 und 2030 abgebildet. Entsprechend der Akzeptanz und der Betrachtung des Maximalpotenzials besteht der Großteil des Potenzials elektrischer Pkw aus Plug-In-Hybridfahrzeugen und das Marktpotenzial steigt in den Jahren 2020 zu 2030 von 49 % auf 57 %. Der Anteil an batterieelektrischen Pkw bleibt dabei in beiden Jahren deutlich unter 10 %. Dieser Anstieg des Marktpotenzials ist vor allem auf die gestiegene Akzeptanz elektrischer Fahrzeuge zurückzuführen, da diese in den meisten Fällen den limitierenden Faktor des Marktpotenzials darstellt.

---

<sup>21</sup> Die Größenklasse „klein“ setzt sich gemäß dem aus der MiD 2008 erstellten Datensatz zu alltäglicher Mobilität zu 20 % aus Fahrzeugen des Segments Mini und zu 80 % aus Fahrzeugen des Segments Kleinwagen zusammen. In diesem Verhältnis wird das für batterieelektrische Pkw ermittelte Marktpotenzial der Größenklasse „klein“ auf die beiden Segmente aufgeteilt.

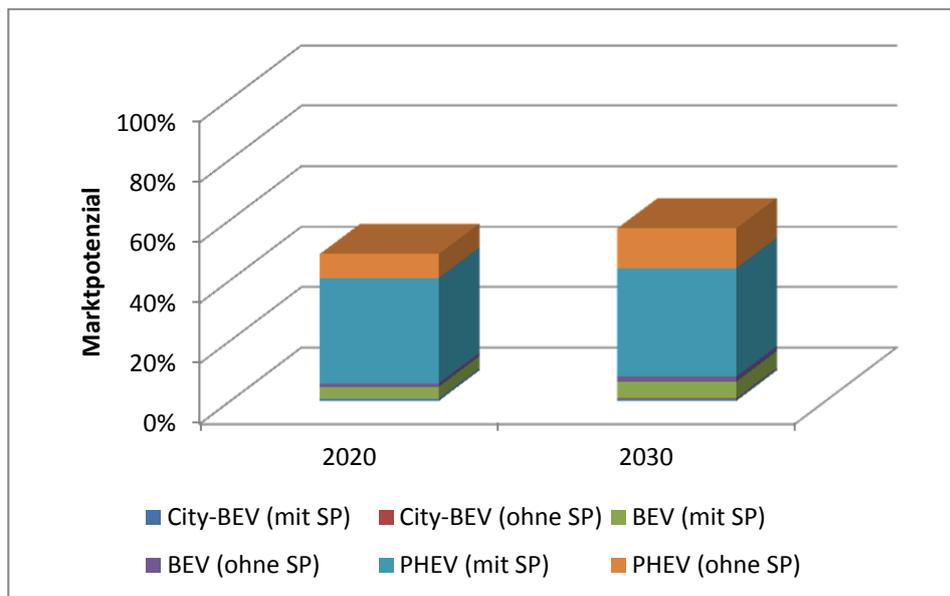


Abbildung 7: Marktpotenzial elektrischer Fahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030 (SP: Stellplatz)

Ein zweiter entscheidender Punkt für den Anstieg des Marktpotenzials elektrischer Fahrzeuge im Jahr 2030 ist der in den Szenarioannahmen hinterlegte, stärkere Ausbau der Ladeinfrastruktur. In der Betrachtung beider Jahre wird das Marktpotenzial für elektrische Fahrzeuge, deren Besitzer über keinen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück verfügen und somit auf die (semi-)öffentliche Infrastruktur angewiesen sind, zu einem großen Teil durch das Maximalpotenzial und somit zumindest teilweise durch die Infrastruktur begrenzt.

### 3.4 Technologiediffusion & Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen

Das in Abbildung 7 illustrierte Marktpotenzial stellt die mögliche maximale Marktnachfrage nach Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung von technischen Restriktionen und Kundenakzeptanz für die Betrachtungsjahre 2020 und 2030 dar. Da dieses das tatsächliche Marktangebot und die jährliche Pkw-Neuzulassungsstruktur jedoch nicht berücksichtigt, kann daraus noch nicht unmittelbar eine Nachfrageentwicklung für Elektrofahrzeuge abgeleitet werden. Das Marktpotenzial ist daher als Größe zu verstehen, die das theoretische Potenzial von Elektrofahrzeugen an den Pkw-Neuzulassungen im jeweiligen Betrachtungsjahr quantifiziert. Welche weiteren Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind und wie sich daraus eine realisierbare Marktdurchdringung ableiten lässt, wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

#### 3.4.1 Technologiediffusion

Technische Innovationen, die sich in einem Markt mit konkurrierenden Technologien befinden, können ihr vollständiges Marktpotenzial in der Regel erst mit der Zeit erschließen. In der Technikgeschichte kann diese Entwicklung anhand zahlreicher Beispiele (Abbildung 8) nachvollzogen werden. Die Marktentwicklung von erfolgreichen Technologien nimmt dabei typischerweise einen S-förmigen Verlauf: auf eine Phase der Nischenanwendung nach Beginn der Markteinführung folgt eine Phase der zunehmenden Marktdurchdringung, bevor sich das

Wachstum wieder abschwächt und die Technologie ihr Sättigungsniveau – also das Marktpotenzial – erreicht.

Die Ursachen für die zeitverzögerte Erschließung des Marktpotenzials können vielfältig sein; bezogen auf die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen wird die Annahme getroffen, dass sich vor allem das Angebot an Fahrzeugen und das Vertrauen der Kunden in die Technologie erst langsam entwickeln und somit die Marktnachfrage insbesondere in den ersten Jahren stark dämpfen wird. Insbesondere im frühen Marktstadium ist eine geringe Stückzahl und Modellauswahl an Elektrofahrzeugen zu erwarten, da zunächst neue kapitalintensive Produktionskapazitäten aufgebaut und Forschungs- und Entwicklungsmittel investiert werden müssen.

Eine Auswertung historischer Daten zur Entwicklung von Innovationen im Automobilsektor [7] zeigt, dass im Mittel erst nach 10 bis 20 Jahren ein Marktanteil von 5 % erreicht wird. Wie sich die zukünftige Marktentwicklung von Elektromobilität darstellt und ob diese mit der konventioneller Technologien im Fahrzeugbau vergleichbar sein wird, kann zum heutigen Zeitpunkt angesichts der Vielzahl an Einflussfaktoren und Wechselwirkungen nicht abschließend beantwortet werden. Die Absatzentwicklung von Hybrid-Pkw in den USA, welche in den USA innerhalb von 10 Jahren einen Marktanteil von 6 % [8] erreichen konnte, stellt eine besonders positive Entwicklung einer verwandten Technologie in jüngster Vergangenheit dar.

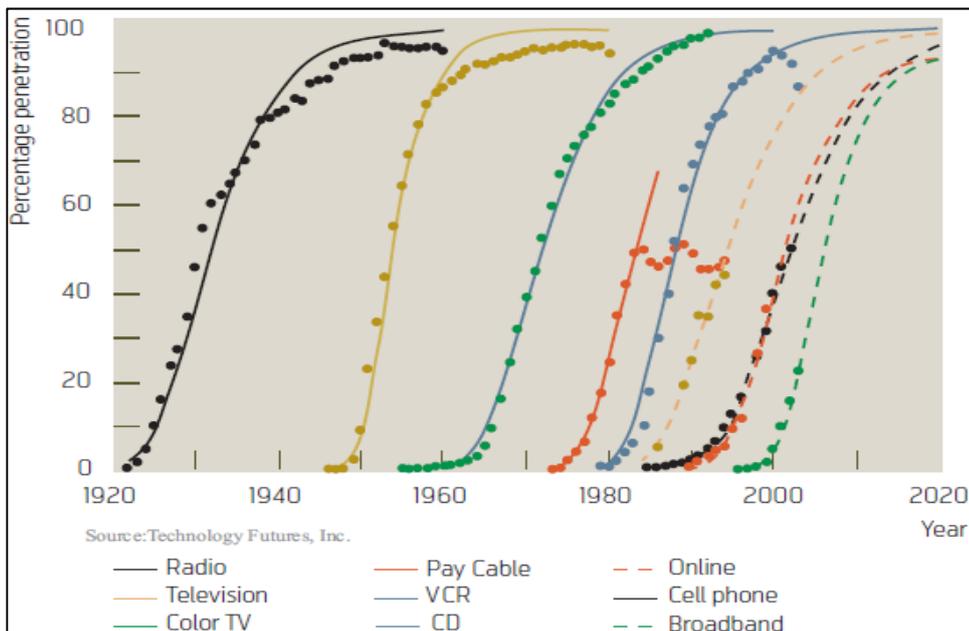


Abbildung 8: Reale Marktentwicklung von Beispielttechnologien und deren Simulation nach Gompertz, Quelle: [9]

Um den zeitlichen Verlauf der Diffusion von innovativen Technologien zu prognostizieren, werden unterschiedliche nicht-lineare Wachstumsmodelle angewendet. Diese Modelle versuchen den Zeitraum zu beschreiben, der notwendig ist, um das maximale Marktpotenzial zu erreichen. Typische Beispiele für solche Wachstumsmodelle sind das Logistische Wachstum-Modell bzw. die Wachstumsmodelle nach Gompertz, Bass und Fisher-Pry. Ursprünglich wurden diese Modelle teilweise zur Simulation biologischer Wachstumsprozesse

entwickelt, in jüngster Zeit konnten diese jedoch erfolgreich für Prognosen zur Marktentwicklung von Technikinnovationen eingesetzt werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Gompertz-Wachstumsmodell zur Simulation der Marktentwicklung eingesetzt, da es sich insbesondere zur Darstellung des frühen Markthochlaufs eignet und im Automobilsektor häufig als Prognosemodell zur Anwendung kommt. Ursprünglich wurde das Modell zur Prognose von Wachstumsprozessen von Tumoren entwickelt. In jüngster Zeit wurde es insbesondere zur Simulation der Marktentwicklung langlebiger Konsumgüter erfolgreich eingesetzt [9].

Das Gompertz-Wachstumsmodell kann durch Gleichung (2) beschrieben werden:

$$AM(t) = Me^{-ae^{-bt}} \quad (2)$$

Die Marktentwicklung elektrischer Fahrzeuge  $AM$ , d.h. der Anteil am Marktpotenzial, der unter Berücksichtigung der Technologiediffusion tatsächlich auf dem Markt verkauft wird, ergibt sich aus dem Marktpotenzial  $M$  (siehe Abschnitt 3.3) sowie einem Regressionsfaktor  $a$  und einer Wachstumsrate  $b$ . Die Variablen  $a$  und  $b$  wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate aus aktuellen Neuzulassungsdaten von Hybrid-Pkw in den USA [8] unter der Annahme eines Potenzials für Hybrid-Pkw am US-Gesamtmarkt von 33 % [10] bestimmt. Die Zeit nach Markteintritt der Elektrofahrzeuge ist dabei durch die Variable  $t$  dargestellt.

Die generierte Technologiediffusionskurve (Abbildung 9) stellt die Dämpfungsfunktion für die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen dar und bezieht sich dabei auf das jeweilige Marktpotenzial im Bezugsjahr. Nach etwa 10 Jahren würden demnach 15 % des Marktpotenzials erschlossen sein, nach 20 Jahren wären bereits mehr als 50 % erreicht.

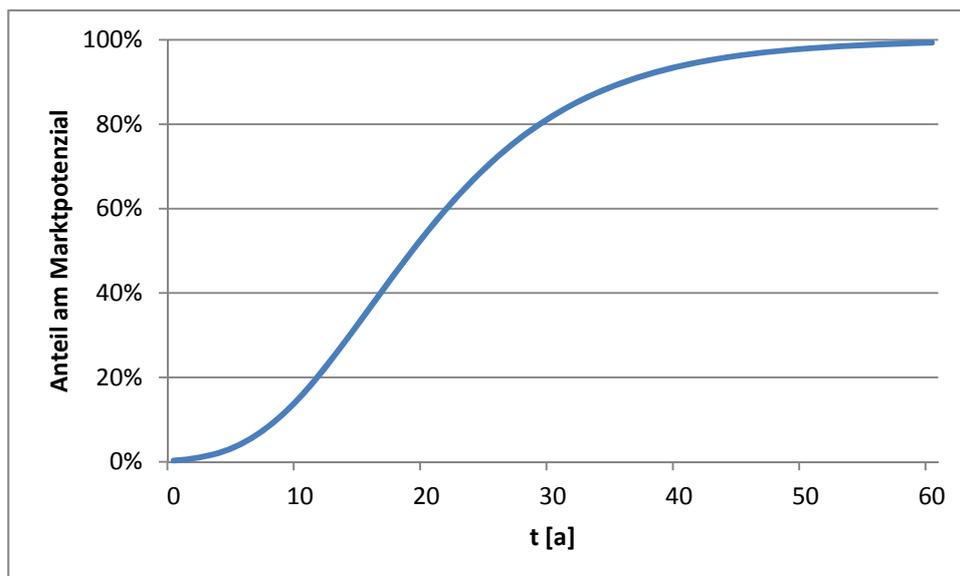


Abbildung 9: Technologiediffusionskurve nach Gompertz (Referenz: Marktentwicklung Hybrid-Pkw in den USA)

### 3.4.2 Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen

Die Erkenntnisse der Marktpotenzialanalysen und die Simulation der Technologiediffusion ermöglichen es, Rückschlüsse auf die Entwicklung der batterieelektrischen Pkw-Neuzulassungen im Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030 zu ziehen. Ausgangspunkt der Betrachtung stellen die durchschnittlichen Pkw-Neuzulassungen in Deutschland von etwa 3,2 Millionen Pkw dar. Für die Szenariobetrachtung wird die Annahme getroffen, dass sich sowohl die Zahl als auch die Segmentstruktur der jährlichen Neuzulassungen im Betrachtungszeitraum nicht verändert.

Das Verhältnis des ermittelten Marktpotenzials von batterieelektrischen Pkw und Plug-In-Hybridfahrzeugen der Jahre 2020 und 2030 zum Pkw-Bestand in der jeweiligen Fahrzeuggrößenklasse (klein, mittel, groß) bildet die Grundlage für die Bestimmung des Anteils an möglichen neuzugelassenen Elektrofahrzeugen im jeweiligen Jahr. Die Neuzulassungsstruktur der Zwischenjahre wird über Interpolation ermittelt. Um die tatsächlichen jährlichen Neuzulassungen an batterieelektrischen Pkw zu ermitteln, wird in einem letzten Schritt die erzeugte Technologiediffusionskurve als Dämpfungsfunktion in Jahresschritten angewendet.

Für das dargestellte Marktszenario Elektromobilität ergibt sich nach einer sehr moderaten Entwicklung in den ersten Jahren ein zunehmend dynamischerer Verlauf der jährlich neu zugelassenen Pkw mit batterieelektrischem bzw. Plug-In-Hybridantrieb. Während im Jahr 2015 erst knapp 20.000 Elektrofahrzeuge neu zugelassen werden, steigt deren Zahl bis 2020 auf knapp 200.000 Fahrzeuge und bleibt im Jahr 2030 knapp unter der Millionenmarke, was einem Marktanteil von 38 % an den Gesamtzulassungen des Jahres entspricht. Über den gesamten Betrachtungszeitraum stellen Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge mit etwa 87 % den Löwenanteil der jährlich neu zugelassenen Elektrofahrzeuge.

Der in Abbildung 10 veranschaulichte Verlauf der jährlichen Nachfrage nach Elektrofahrzeugen bildet die Grundlage für die Simulation der Bestandsentwicklung (siehe Kapitel 5).

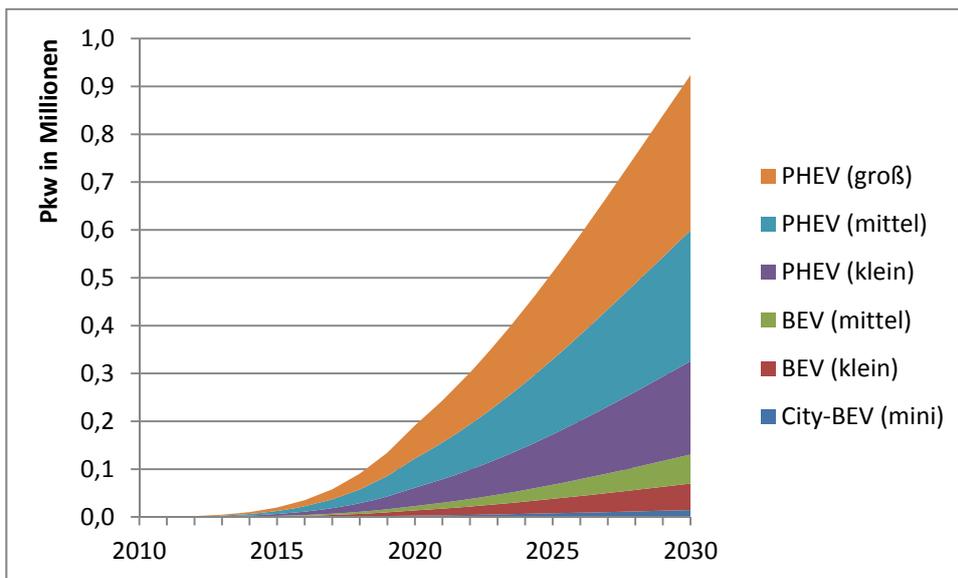


Abbildung 10: Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen an batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Pkw in Deutschland

Zwar stellt die absolute Stückzahl an Elektrofahrzeugen im betrachteten Szenario in den ersten 10 Jahren im Kontext der Gesamtzahl an jährlichen Pkw-Neuzulassungen eine untergeordnete Größe dar, jedoch sind die jährlichen Wachstumsraten in den ersten 20 Jahren – insbesondere im Vergleich zur Entwicklung anderer Technologieinnovationen im Automobilsektor – außerordentlich bedeutsam. Die mittlere jährliche Wachstumsrate der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge im Marktszenario beträgt für die ersten 20 Jahre bis 2030 55 %. In der ersten Dekade liegt der durchschnittliche jährliche Zuwachs – angesichts geringer absoluter Stückzahlen – mit 95 % besonders hoch. In der zweiten Dekade wird ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 15 % erreicht. Die besondere Dynamik, die dem Szenario Elektromobilität zugrunde liegt, wird im Vergleich zu historischen Entwicklungen von Automobiltechnologien klar (Tabelle 4). Die in Deutschland besonders erfolgreiche Dieselmotortechnologie erreichte beispielsweise in den letzten 20 Jahren ein mittleres Wachstum von 8,5 % p.a. [11] Automatikgetriebe und Vorderradantrieb – als Beispiele für besonders erfolgreiche Automobiltechnologien im US-Markt – erreichten in den USA langfristige mittlere Zuwachsraten von 15 bzw. 16,5 % p.a. [11].

Tabelle 4: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten von Technologieinnovationen im Automobilsektor

| Technologie [Land]      | Mittlere jährliche Wachstumsrate | Zeitraum | Quelle |
|-------------------------|----------------------------------|----------|--------|
| Diesel-Pkw [D]          | 8,5 % p.a.                       | 20 Jahre | [11]   |
| Erdgas-Pkw [D]          | 19 % p.a.                        | 15 Jahre | [11]   |
| Hybrid-Pkw [D]          | 33 % p.a.                        | 8 Jahre  | [11]   |
| Automatikgetriebe [USA] | 15 % p.a.                        | 20 Jahre | [8]    |
| Vorderradantrieb [USA]  | 16,5 % p.a.                      | 20 Jahre | [8]    |

Im Kontext dieser historischen Vergleichsdaten wird der hier dargestellte Verlauf der Marktentwicklung von Elektromobilität als äußerst ambitioniert bewertet. Diese Entwicklung setzt voraus, dass sich das Marktumfeld innerhalb weniger Jahre besonders vorteilhaft für Elektromobilität entwickelt und das Angebot an Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 sich mit großer Dynamik entwickelt.

## Entwicklung Pkw-Bestand und Fahrleistung

### 4.1 Bestandsmodell

Das im Rahmen des Forschungsvorhabes OPTUM entwickelte Pkw-Bestandsmodell ermöglicht es, die Entwicklung des deutschen Pkw-Bestands bis zum Jahr 2030 abzubilden und die Veränderung von Fahrleistung und Energiebedarf differenziert nach Kraftstoffen zu quantifizieren.

Grundsätzlich berechnet das Modell auf Grundlage des Pkw-Bestands des Vorjahres für das Folgejahr einen aktualisierten Bestand, der sich aus den Neuzulassungen sowie den Bestandsabgängen des jeweiligen Jahres ergibt. Ziel des Modells ist es, nicht die absolute Bestandsentwicklung bis 2030 zu prognostizieren, sondern die Veränderung der Struktur des Pkw-Bestands – insbesondere unter Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen – abzubilden.

#### Größenklassen und Antriebstypen

Im Bestandsmodell wird zwischen drei Größenklassen und 4 Antriebsoptionen unterschieden. Die Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“ fassen wie bereits in der Modellierung der Marktentwicklung (Tabelle 2) ähnliche Fahrzeuge mehrerer KBA-Segmente in einer Kategorie zusammen. Diese werden im Modell jeweils durch ein Referenzfahrzeug repräsentiert, welches für zentrale Eigenschaften, wie den Energieverbrauch und die Jahresfahrleistung, ein Durchschnittsfahrzeug der zusammengefassten Segmente für ein bestimmtes Zulassungsjahr abbildet.

Die drei Größenklassen sind im Modell mit vier Antriebsoptionen kombiniert. Neben konventionellen Pkw mit Otto- bzw. Diesel-Motorisierung berücksichtigt das Modell die Fahrzeugtypen batterieelektrischer und Plug-In-Hybrid-Pkw in den jeweiligen Größenklassen.

#### Simulation der Bestandsentwicklung

Die Struktur des Altbestands sowie die assoziierten fahrzeugspezifischen Energieverbräuche werden in der diskutierten Differenzierung nach Antriebstyp und Größenklassen aus TREMOD [12] übernommen. Zwar unterscheidet sich die Systematik der Größenklassenzuordnung zwischen beiden Modellen, da TREMOD die Zuordnung nach Hubraum vornimmt und im hier vorgestellten Bestandsmodell die Zuordnung nach KBA-Segmenten erfolgt, jedoch sind bereits 2010 knapp 40 % der Altfahrzeuge (aus TREMOD) aus dem Bestand ausgeschieden und 2020 nahezu 90 % nicht mehr im Bestand und somit in der Gesamtbetrachtung im Zeitraum 2010 bis 2030 von untergeordneter Bedeutung.

Die Fahrzeugneuzulassungen werden in Jahresschritten modelliert. Im Referenzfall ohne Elektromobilität basiert die Neuzulassungsstruktur im Jahr 2010 auf den aktuellen Neuzulassungszahlen des Kraftfahrtbundesamts [13]. Diese Neuzulassungsstruktur wird für den Referenzfall für die Jahre 2020 und 2030 konstant fortgeschrieben. Gegenüber dem aktuellen Pkw-Bestand [13] steigt unter diesen Annahmen der Anteil von Dieselfahrzeugen von 26,6 % langfristig weiter auf über 42 % an. Eine ähnliche Annahme wird auch in TREMOD getroffen (Dieselanteil: 45 %).

Tabelle 5: Struktur der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2010, Quelle: [11]

| Otto   |        |        | Diesel |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| klein  | mittel | groß   | klein  | mittel | groß   |
| 23,7 % | 23,9 % | 10,1 % | 2,3 %  | 17,7 % | 22,3 % |

Für die jährlichen Pkw-Neuzulassungen wird angenommen, dass sich die Anzahl der Neuzulassungen, wie auch in TREMOD, im Betrachtungszeitraum auf einem Niveau von 3,2 Millionen Pkw einpendeln. Den jährlichen Neuzulassungen gegenüber stehen Fahrzeuge, die aus dem Bestand ausscheiden. In Anlehnung an TREMOD wird differenziert nach Antriebstyp und Größenklassen die Dauer der Bestandszugehörigkeit definiert. Tendenziell scheiden Fahrzeuge mit geringer Fahrleistung (Otto-Pkw) später als Pkw mit hoher Jahresfahrleistung (Diesel-Pkw) aus dem Bestand aus. Wie in Abbildung 11 veranschaulicht, gehören 10 Jahren nach der Zulassung noch etwa 80 % der Otto-Pkw dem Bestand an, während im Fall von Dieselfahrzeugen bereits 50 % aus dem Bestand ausgeschieden sind. Nach etwa 20 Jahren sind weniger als 10 % der Fahrzeuge noch in Betrieb. Für batterieelektrische und Plug-In-Hybrid-Pkw wird die Annahme getroffen, dass sich deren Bestandszugehörigkeit nach 10 Jahren auf 90 % und in den folgenden 10 Jahren auf 5 % verringert.

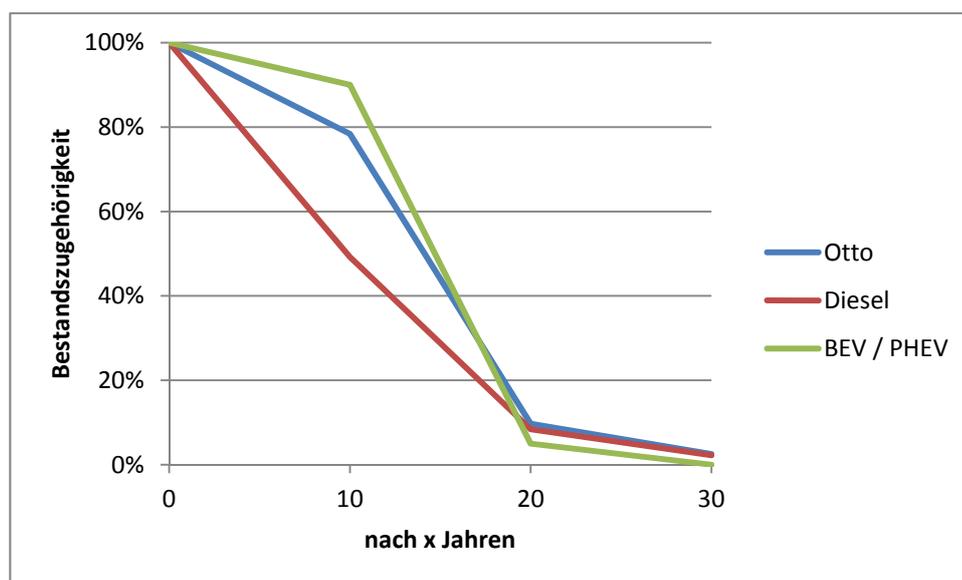


Abbildung 11: Bestandszugehörigkeit x Jahre nach der Zulassung

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Bestandszu- und -abgänge stabilisiert sich der Bestand im Modell bis zum Jahr bei etwa 42 Millionen Pkw, was in etwa auch dem heutigen Pkw-Bestand von 42,3 Millionen Fahrzeugen [13] entspricht und auch im Modell TREMOD als Grundannahme hinterlegt ist.

Für das Szenario Elektromobilität bildet die in Kapitel 3.4 dargestellte Neuzulassungsstruktur von batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Pkw die wesentliche Eingangsgröße, um die Bestandsentwicklung für den Zeitraum 2010 bis 2030 zu simulieren. Im Bestandsmodell

werden gemäß der modellierten Struktur konventionelle Pkw-Neuzulassungen durch Elektrofahrzeuge segmentspezifisch ersetzt. So substituiert beispielsweise ein Fahrzeug des Typs „City-BEV“ einen Kleinwagen mit Otto-Motorisierung und simuliert somit die veränderte Fahrzeugwahl im jeweiligen Betrachtungsjahr. Grundsätzlich wird angenommen, dass Elektrofahrzeuge konventionelle Pkw mit Otto- bzw. Dieselmotorisierung gemäß deren relativen Verhältnis im jeweiligen Segment ersetzen. Das heißt beispielsweise, dass in einem Segment, in dem Dieselfahrzeuge einen Anteil von 20 % am Pkw-Bestand haben, nur jedes fünfte Elektrofahrzeug einen Diesel-Pkw ersetzt und 80 % der Elektrofahrzeuge in diesem Segment Otto-Pkw substituieren.

### **Jahresfahrleistung**

Die Jahresfahrleistung wird im Modell nach Antriebstyp und Fahrzeuggrößenklasse unterschieden. Die Ausgangswerte für das Jahr 2010 bilden für konventionelle Pkw mit Otto- bzw. Diesel-Motorisierung die antriebs- und größenklassenspezifischen Analysen der Jahresfahrleistungsdaten aus der Verkehrserhebung „Mobilität in Deutschland“ [14]. Grundsätzlich lassen sich zwei besondere Unterscheidungsmerkmale festhalten. Kleine Fahrzeuge haben im Durchschnitt geringere Jahresfahrleistungen als größere Fahrzeuge. Noch ausgeprägter ist dieser Unterschied bezogen auf den Motortyp: Diesel-Fahrzeuge haben eine wesentlich höhere Jahresfahrleistung als Otto-Fahrzeuge. Diese Tendenzen werden auch durch weitere Erhebungen bestätigt [15] und finden in anderen Modellen [12] in ähnlicher Weise Berücksichtigung. Die Annahmen zur durchschnittlichen Fahrleistung von batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Pkw ergeben sich aus den MiD-Analysen zu den typischen Fahrprofilen von Elektrofahrzeugen (Kapitel 5).

Die Entwicklung der Pkw-Gesamtfahrleistung orientiert sich an der Verkehrsprognose 2025 des Bundesverkehrsministeriums und der Fortschreibung bis zum Jahr 2030 gemäß TREMOD [16]. Diese geht von einem weiteren Anstieg der Fahrleistung um 15 % von 582,5 Milliarden Kilometern (2010) auf etwa 673 Milliarden Kilometern (2030) aus. Da sich der Pkw-Bestand im Modell in diesem Zeitraum nur unwesentlich verändert, wird diese Steigerung über die Annahme einer – gegenüber dem Ausgangsniveau in 2010 – höheren durchschnittlichen Jahresfahrleistung von konventionellen Pkw im Jahr 2020 und 2030 umgesetzt (siehe auch Tabelle 6). Die Veränderung der durchschnittlichen Fahrleistung von Elektrofahrzeugen zwischen den Jahren 2020 und 2030 ergibt sich aus dem veränderten Potenzial an substituierbaren Pkw im Bestand.

In der Bestandsbetrachtung wird angenommen, dass konventionelle Fahrzeuge durch elektrische Fahrzeuge substituiert werden. Wie in Tabelle 6 veranschaulicht, haben insbesondere batterieelektrische Pkw jedoch eine deutlich geringere Jahresfahrleistung, d.h. sie werden lediglich konventionelle Fahrzeuge mit unterdurchschnittlicher Jahresfahrleistung ersetzen können. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass bei entsprechender Substitution die durchschnittliche Jahresfahrleistung der verbleibenden konventionellen Pkw im Bestand weiter ansteigt. Dies wird bei der Bestandsmodellierung berücksichtigt, so dass sich die Gesamtfahrleistung des Pkw-Bestands auch nach der zunehmenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen von einer Entwicklung ohne Elektrofahrzeuge nicht unterscheidet.

Tabelle 6: Jahresfahrleistung differenziert nach Antriebstyp und Größenklasse

| Antriebstyp | Größenklassen       | Jahresfahrleistung |           |           |
|-------------|---------------------|--------------------|-----------|-----------|
|             |                     | 2010               | 2020      | 2030      |
| Otto        | klein               | 9.529 km           | 10.765 km | 11.165 km |
|             | mittel              | 10.724 km          | 12.116 km | 12.566 km |
|             | groß                | 10.909 km          | 12.324 km | 12.782 km |
| Diesel      | klein               | 16.581 km          | 18.732 km | 19.428 km |
|             | mittel              | 19.434 km          | 21.955 km | 22.771 km |
|             | groß                | 20.974 km          | 23.694 km | 24.575 km |
| City-BEV    | klein               | 7.432 km           | 7.432 km  | 7.159 km  |
| BEV         | klein, mittel       | 7.909 km           | 7.909 km  | 8.014 km  |
| PHEV        | klein, mittel, groß | 13.672 km          | 13.672 km | 13.672 km |

Da die jeweiligen Antriebstypen und Größenklassen im Bestandsmodell mit fahrzeugtypischen Jahresfahrleistungen gekoppelt sind, lässt sich die Pkw-Gesamtfahrleistung differenziert nach Kraftstoffart für den Zeitraum 2010 bis 2030 bestimmen. Einen Sonderfall stellen jedoch Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge dar, da diese in zwei Fahrmodi (elektrisch und verbrennungsmotorisch) – je nach Fahrsituation und Batterieladestand – betrieben werden können. Der durchschnittliche elektrische Fahranteil von Plug-In-Hybrid-Pkw im Bestandsmodell leitet sich aus der Simulation der Fahrzeugnutzung und Batterieladung in PowerFlex ab (siehe Abschnitt 6). Für die dort betrachteten typischen PHEV-Nutzungsprofile und unter Berücksichtigung der elektrischen Reichweite sowie der im jeweiligen Jahr verfügbaren Ladeinfrastruktur wurde ein durchschnittlicher elektrischer Fahranteil von 68 % (2020) und 67 % (2030) ermittelt. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingung lässt sich somit auch für Plug-in-Hybrid-Pkw die Jahresfahrleistung differenziert nach Kraftstoffart bestimmen.

## 4.2 Bestandsentwicklung Elektromobilität

Wie aus den Ergebnissen des Kapitels 3 hervorgeht, steigt die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2030 mit zunehmender Dynamik an. Wie zuvor erläutert, bildet die ermittelte jährliche Neuzulassungsstruktur die Grundlage für die Simulation des Fahrzeugbestands bis zum Jahr 2030. Wie Abbildung 12 veranschaulicht, erreicht der Bestand an batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Pkw im Szenario Elektromobilität etwa 538.000 Fahrzeuge im Jahr 2020 und rund 5.870.000 Fahrzeuge im Jahr 2030. Die Millionenmarke wird in diesem Szenario im Jahr 2022 überschritten. Der Bestand an Elektrofahrzeugen wird mit etwa 88 % von Plug-In-Hybridfahrzeugen dominiert. Diese erreichen bereits im Jahr 2020 rund 473.000 Fahrzeuge im Bestand, während BEV und City-BEV lediglich 57.000 bzw. 8.000 Fahrzeuge im selben Jahr stellen. Bis 2030 steigt die Zahl der PHEV auf rund 5.080.000 Pkw an, BEV und City-BEV steigern sich ebenfalls deutlich auf 700.000 bzw. 90.000 Fahrzeuge. Plug-In-Hybridfahrzeuge sind überdurchschnittlich häufig in der Kategorie „groß“ vertreten,

während batterieelektrische Fahrzeuge in der Kategorie „klein“ konventionelle Pkw in überdurchschnittlicher Häufigkeit substituieren. Bezogen auf den bundesdeutschen Pkw-Gesamtbestand erreichen Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 einen Anteil von 1,3 % bzw. 13,9 % im Jahr 2030.

Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des Bestands an Elektrofahrzeugen beträgt in den ersten 20 Jahren etwa 74 %. In der zweiten Dekade ab 2021 beträgt das durchschnittliche Bestandswachstum 24 %.

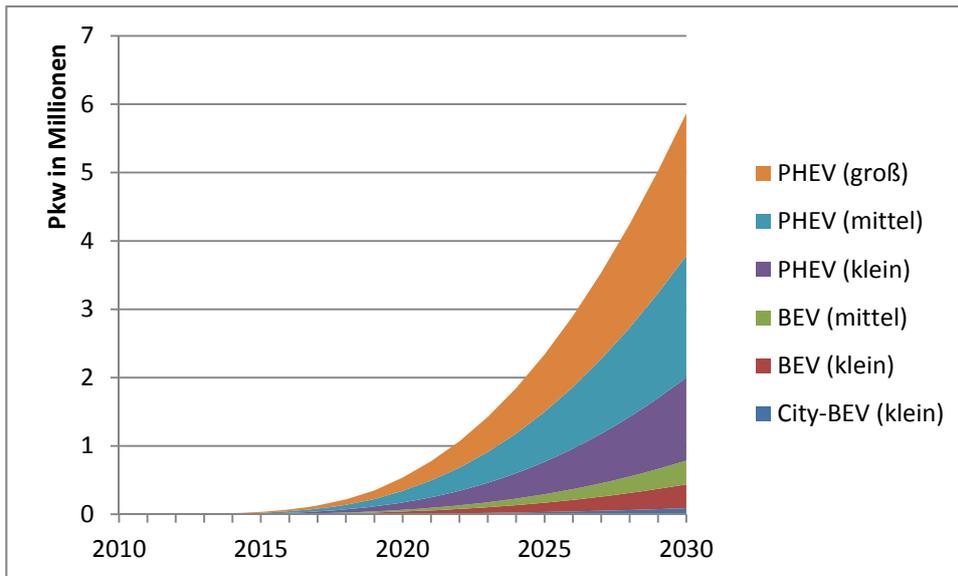


Abbildung 12: Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen

Abbildung 13 veranschaulicht die Struktur der durch Elektrofahrzeuge im Bestand ersetzten konventionellen Pkw. Während in der Kategorie „groß“ Plug-In-Hybridfahrzeuge vorwiegend Dieselfahrzeuge ersetzen, dreht sich das Verhältnis bei Kleinwagen um und es werden vorwiegend Pkw mit Otto-Motor durch Elektrofahrzeuge substituiert. In der mittleren Größenklasse ist das Verhältnis an verbrennungsmotorischen Pkw, die durch batterieelektrische bzw. Plug-In-Hybridfahrzeuge ersetzt werden, zwischen Otto und Diesel relativ ausgewogen.

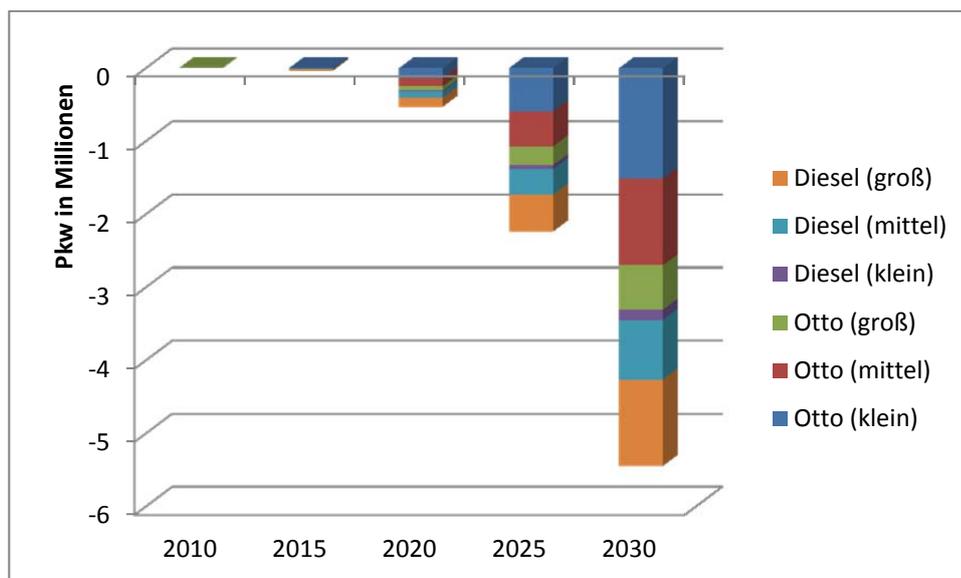


Abbildung 13: Durch Elektrofahrzeuge substituierte konventionelle Pkw

### 4.3 Entwicklung der elektrischen Fahrleistung

Wie bereits in Abschnitt 4.1 diskutiert, zeichnen sich insbesondere batterieelektrische Pkw im Vergleich zu konventionellen Vergleichsfahrzeugen durch eine deutlich geringere Jahresfahrleistung aus. Unter Berücksichtigung der antriebs- und größenklassenspezifischen Jahresfahrleistung ermöglicht das Bestandsmodell, für unterschiedliche Bestandsentwicklungen die Struktur der Pkw-Gesamtfahrleistung zu analysieren. Wie bereits erläutert, bildet die Verkehrsprognose 2025 dabei die Referenz für die Entwicklung der Gesamtfahrleistung. Insbesondere für die CO<sub>2</sub>-Betrachtung (Kapitel 7) ist relevant, wie sich die elektrische Fahrleistung darstellt. Zwar bildet die Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen die Grundlage für diese Analysen, entscheidend für die Quantifizierung von Energiebedarf und Emissionen des Pkw-Verkehrs ist jedoch in welcher Größenordnung konventionelle durch elektrische Fahrleistung substituiert wird.

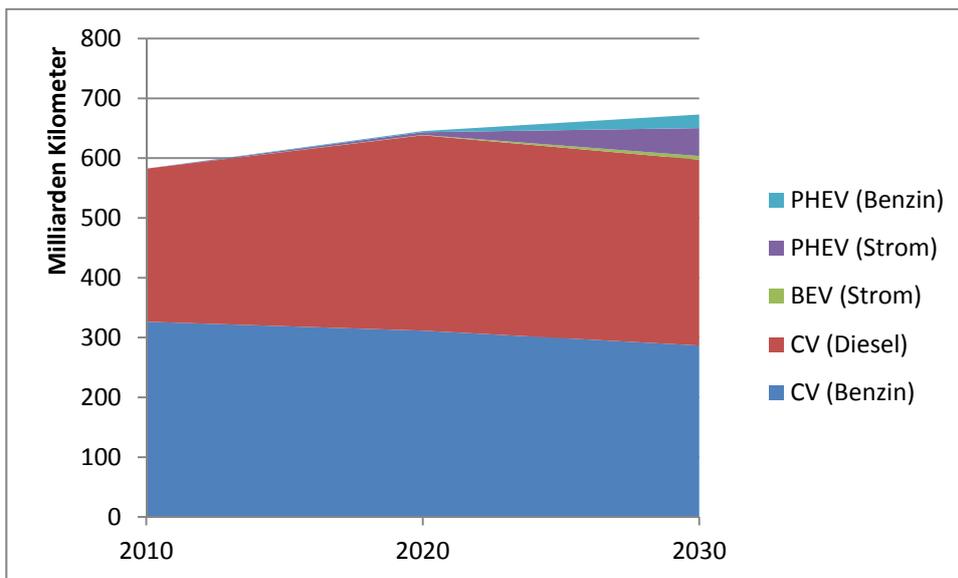


Abbildung 14: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung im Szenario Elektromobilität

Abbildung 14 veranschaulicht die Entwicklung der Pkw-Fahrleistung im Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030 differenziert nach Antriebstyp und eingesetztem Kraftstoff. Plug-In-Hybrid-Pkw und batterieelektrische Fahrzeuge erreichen demnach bis zum Jahr 2020 einen Anteil an der Pkw-Gesamtfahrleistung von 1,1 %. Da Plug-In-Hybrid-Pkw teilweise auch verbrennungsmotorisch betrieben werden, beträgt die rein elektrische Fahrleistung nur etwa 0,8 %. Bis zum Jahr 2030 steigt die Fahrleistung von Elektrofahrzeugen auf über 11 %, die rein elektrische Fahrleistung erreicht knapp 8 %. Der Anteil von batterieelektrischen Fahrzeugen an der Gesamtfahrleistung bleibt auch im Jahr 2030 unter 1 %, obwohl diese dann bereits einen Anteil am Fahrzeugbestand von 1,3 % haben. Dies erklärt sich mit der unterdurchschnittlichen Jahresfahrleistung von batterieelektrischen Pkw im Vergleich zu konventionellen Pkw und Plug-In-Hybridfahrzeugen.

Tabelle 7: Anteil von Plug-In-Hybrid- und batterieelektrischen Pkw an der Gesamtfahrleistung, differenziert nach Energieträgereinsatz

| Jahr | PHEV & BEV (Strom & Benzin) | BEV & PHEV (Strom) | BEV (Strom) |
|------|-----------------------------|--------------------|-------------|
| 2010 | 0 %                         | 0 %                | 0 %         |
| 2020 | 1,1 %                       | 0,8 %              | 0,1 %       |
| 2030 | 11,3 %                      | 7,9 %              | 0,9 %       |

Wie in Abbildung 15 dargestellt, substituieren Elektrofahrzeuge mit zunehmender Marktdurchdringung die Fahrleistung, die im Referenzfall ohne Elektrofahrzeuge von konventionellen Pkw mit Otto- oder Diesel-Motor erbracht wird. Im Jahr 2020 werden etwa 7 Milliarden Pkw-Kilometer durch Elektrofahrzeuge substituiert, im Jahr 2030 über 75 Milliarden Kilometer. Der Anteil der substituierten Fahrleistung, der im Referenzfall durch Diesel-Fahrzeuge erbracht wird, liegt leicht über dem von Otto-Fahrzeugen. Der überwiegende Anteil der konventionellen Fahrleistung (46 Milliarden Kilometer) wird durch Plug-In-Hybrid-

Pkw im elektrischen Modus substituiert. Etwa 6 Milliarden Pkw-Kilometer können im Jahr 2030 durch batterieelektrische Pkw erbracht werden.

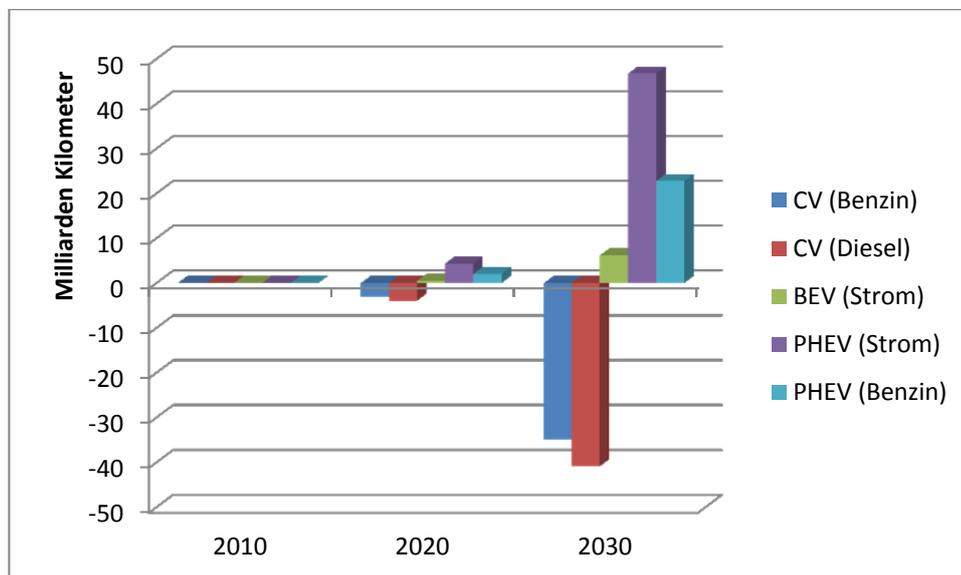


Abbildung 15: Veränderung der Fahrleistung (differenziert nach Antriebstyp und Energieträger) zwischen einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge und dem Szenario Elektromobilität

## Fahrzeugnutzungsprofile Elektromobilität

Für die Bestimmung der Stromnachfrage von Elektromobilität und der assoziierten Treibhausgasemissionen sind neben der Entwicklung des absoluten Fahrzeugbestands (Kapitel 4) Informationen zur Nutzung der Fahrzeuge erforderlich. Grundsätzlich beruht bereits die ermittelte Marktentwicklung auf Fahrzeugen, die aufgrund ihrer Nutzung für den Einsatz von batterieelektrischen Pkw in Frage kommen. Für die Strommarktmodellierung (PowerFlex)<sup>22</sup> ist es jedoch notwendig, detaillierte Informationen zu deren Fahrprofil zu erhalten, um mögliche Ladezeitpunkte und -orte zu bestimmen und die Stromnachfrage zeitlich aufgelöst zu simulieren.

Im Rahmen der Ableitung der Marktentwicklung wurde aus den Daten der MiD 2008 ein Fahrzeugdatensatz für das alltägliche Mobilitätsverhalten aufbereitet, in dem detailliert Aufschluss über die Fahrdistanzen, Fahrt- und Standdauern sowie über die jeweiligen Standorte der Fahrzeuge gegeben wird. Durch die Kombination der Nutzungsprofile einzelner Pkw der Stichtagsbefragung zu Wochennutzungsprofilen liegen in diesem Datensatz Fahrprofile über eine gesamte Woche vor, so dass das unterschiedliche Mobilitätsverhalten zwischen Werktagen und dem Wochenende für das alltägliche Mobilitätsverhalten damit abgedeckt ist und aus diesem Datensatz typische Nutzungsprofile für die verschiedenen Arten an elektrischen Pkw abgeleitet werden können. Abschließend werden insgesamt 60 Fahrprofile ausgewählt, die in der Strommarktmodellierung und in der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung repräsentativ die Nutzung elektrischer Pkw darstellen.

### 5.1 Vorgehen / Datengrundlage

Auf den folgenden Seiten soll näher auf die Ableitung von typischen Fahrzeugnutzungsprofilen eingegangen werden, die einerseits in hohem Detailgrad in der Strommarktmodellierung zur Abbildung der Fahrzeugnutzung verwendet, andererseits auf aggregierter Ebene zur Ableitung der Fahrleistung elektrischer Fahrzeuge in der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eingesetzt werden. In der Aufbereitung der Daten der MiD 2008 wurde das auf Personenebene erfasste Mobilitätsverhalten zunächst in tägliche Pkw-Nutzungsprofile umstrukturiert und in einem zweiten Schritt zu Wochennutzungsprofilen einzelner Fahrzeuge umgewandelt. Dieser durch diesen Umstrukturierungsprozess erstellte Datensatz stellt durch die Auswahl als „normal“ deklariertes Fahrten die Pkw-Nutzung im Rahmen des alltäglichen Mobilitätsverhaltens dar und ist somit eine geeignete Datenbasis für typische Nutzungsprofile von Fahrzeugen.

Zudem ist aus den Erkenntnissen der Ableitung der Marktentwicklung von elektrischen Fahrzeugen erkennbar, dass das alltägliche Mobilitätsverhalten mit batterieelektrischen Fahrzeugen zumeist problemlos abdeckbar ist, lange, unregelmäßig vorkommende Pkw-Fahrten über der Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge den Einsatz rein elektrischer Pkw allerdings beschränken. Somit ist davon auszugehen, dass die alltägliche Fahrzeugnutzung ein wahrscheinliches Nutzungsverhalten von batterieelektrischen Pkw darstellt und die Ableitung von Nutzungsprofilen für diese Pkw aus einem Datensatz, der das alltägliche Mobilitätsverhalten beschreibt, eine geeignete Vorgehensweise ist.

---

<sup>22</sup> Auf die Strommarktmodellierung wird detailliert in Kapitel 6 eingegangen.

Während der angesprochenen Umstrukturierung der Daten der MiD 2008 zu Wochennutzungsprofilen wurden damit für jedes Fahrzeug u.a.

- » der Start der ersten Fahrt des Tages,
- » die längste Standzeit des Tages inklusive des Standortes,
- » das Ende der letzten Fahrt des Tages,
- » die Tagesfahrleistung

erfasst, die im weiteren Vorgehen als Eigenschaften für die Darstellung der Fahrzeugnutzung in Fahrzeugnutzungsprofilen dienen. Mit diesem Vorgehen sind die entscheidenden Größen der Fahrzeugnutzung für die Strommarktmodellierung abgebildet und die Gesamtfahrleistung der batterieelektrischen Fahrzeuge kann für die Treibhausgasbilanzierung abgeleitet werden.

Mit der Begrenzung auf die vier aufgeführten Eigenschaften bei der Ableitung der Fahrzeugnutzungsprofile wird in der Strommarktmodellierung angenommen, dass alle Pkw über Nacht, d.h. zwischen der letzten Fahrt desselben und der ersten Fahrt des folgenden Tages, zuhause stehen und die erste und die letzte Fahrt des Tages zuhause beginnt bzw. endet. Zudem werden dadurch für alle betrachteten Fahrzeuge pro Tag nur zwei Fahrten und eine Standzeit während des Tages mit der Möglichkeit der Batterieladung dargestellt<sup>23</sup>. Dadurch wird für die Strommarktmodellierung die Annahme getroffen, dass in den restlichen, kürzeren Standzeiten des Tages nicht geladen wird und mehrere, aufeinander folgende Fahrten zu einer Fahrt mit der Gesamtfahrleistung dieser Fahrten zusammengefasst werden.

Bei der Bestimmung der Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten wird generell so vorgegangen, dass für einige Nutzungseigenschaften der Fahrzeuge Kategorien gebildet werden und die einzelnen Fahrzeuge entsprechend ihrer Nutzungseigenschaften in verschiedene Profile eingeteilt werden (Tabelle 8). Somit lassen sich neben der relativen Verteilung der Nutzungsprofile für alle Profile die oben genannten Eigenschaften über Mittelung der einzelnen Fahrzeugdatensätze bestimmen. Durch dieses Vorgehen wird mit den Fahrzeugnutzungsprofilen ein durchschnittliches Mobilitätsverhalten abgeleitet. Extremfälle – wie beispielsweise die Fahrzeugnutzung über Nacht – werden nicht abgebildet, stellen anhand der Analyse der Mobilitätsdaten der MiD allerdings eine Minderheit der Nutzungsgewohnheiten im Alltag dar.

Da bei Plug-In-Hybrid-Pkw neben dem elektrischen Antrieb ein Verbrennungsmotor zur Verfügung steht und so auch bei niedrigem Batterieladestand der Fahrzeugbetrieb gewährleistet ist, können auch lange Fahrten problemlos zurückgelegt werden. Daher müssen solche Fahrten für diese Fahrzeuge gesondert betrachtet und zu der aus dem alltäglichen Mobilitätsverhalten abgeleiteten Fahrzeugnutzung hinzugefügt werden. Im Modell wurde daher die Differenz zwischen der durchschnittlichen Jahresfahrleistung konventioneller Pkw und der Jahresfahrleistung, die sich alleine aus der Summe des alltäglichen Fahrzeugeinsatzes ergibt, für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge durch die Integration zusätzlicher unregelmäßiger langer Fahrten

---

<sup>23</sup> In der Ableitung des Maximalpotenzials werden dagegen alle Standzeiten und -orte für die Bestimmung des Maximalpotenzials verwendet.

in die Wochennutzungsprofile berücksichtigt. Diese wurden in den Nutzungsprofilen für Plug-In-Hybridfahrzeuge jeweils über das gesamte Jahr zufällig verteilt und variieren in ihrer Länge. Jeder Hinfahrt steht jeweils eine Rückfahrt derselben Distanz in der Folgewoche gegenüber.

## 5.2 Typische Fahrzeugnutzung im Alltag

In diesem Abschnitt wird auf die Fahrzeugnutzungsprofile eingegangen, die sich aus dem Datensatz des alltäglichen Mobilitätsverhaltens ableiten und nach der Kombination zu Wochennutzungsprofilen in der Strommarktmodellierung und zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eingesetzt werden. Diese Nutzungsprofile werden aufgrund des unterschiedlichen Nutzungsverhaltens an den einzelnen Tagen getrennt für Werktag, Samstag und Sonntag präsentiert. Durch die Zusammenfassung dieser Profile zu Wochennutzungsprofilen entstehen auf Basis der MiD-Datenaufbereitung (Abschnitt 3.1.3) insgesamt 99 Wochennutzungsprofile. Die Auswahl der 60 Nutzungsprofile, die im weiteren Verlauf des Vorgehens die Nutzung von Elektrofahrzeugen repräsentieren, wird im folgenden Kapitel erläutert.

Bei der Einteilung in Fahrzeugnutzungsprofile wird aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzung darauf verzichtet, für alle Tage dieselben Kriterien zur Einteilung in Profile zu verwenden (Tabelle 8). Vielmehr wurden in einem ersten Analyseschritt detaillierte Fahrzeugnutzungsprofile mit denselben Einteilungskriterien ermittelt, diese dann aber anhand ähnlicher Ausprägungen in den Eigenschaften der Fahrzeugnutzung zu wenigen Fahrzeugnutzungsprofilen zusammengefasst.

Wie in Tabelle 8 erkennbar ist, wird bei Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens an allen Tagen ein großer Teil der Fahrzeuge überhaupt nicht bewegt. Die Nicht-Nutzung der Pkw ist am Wochenende verständlicherweise stärker ausgeprägt, da an diesen Tagen nur wenige Fahrten unternommen werden, um zur Arbeit zu gelangen. Fahrten zu Einkaufs- und Freizeitzielen überwiegen daher an den Wochenendtagen, so dass sich für die betrachteten Tage eine stark unterschiedliche Nutzung der Pkw ergibt.

Tabelle 8: Kriterien zur Einteilung in Fahrzeugnutzungsprofile

| Profil | Tag     | Kriterien      |  |                        | Anteil je Tag [%] |                        |
|--------|---------|----------------|--|------------------------|-------------------|------------------------|
|        |         | Anzahl Fahrten | Zweck  | Start der ersten Fahrt |                   | Tagesfahrleistung [km] |
| 1_0    | Werktag | 0              | -  | -                      | -                 | 38                     |
| 1_1    | Werktag | -              | -  | 00:00 – 12:00          | > 37,5            | 19                     |
| 1_2    | Werktag | -              | mindestens 1 Fahrt zur Arbeitsstelle   | -                      | < 37,5            | 18                     |
| 1_3    | Werktag | -              | keine Fahrt zur Arbeitsstelle  | 00:00 – 12:00          | < 37,5            | 16                     |
| 1_4    | Werktag | -              | -  | 12:00 – 24:00          | -                 | 9                      |
| 2_0    | Samstag | 0              | -  | -                      | -                 | 47                     |
| 2_1    | Samstag | 2-3            | keine Fahrt zur Arbeitsstelle  | 00:00 – 12:00          | < 37,5            | 15                     |
| 2_2    | Samstag | -              | -  | 12:00 – 24:00          | -                 | 14                     |
| 2_3    | Samstag | -              | mindestens 1 Fahrt zur Arbeitsstelle + keine Fahrt zur Arbeitsstelle (> 3 Fahrten) | 00:00 – 12:00          | < 37,5            | 13                     |
| 2_4    | Samstag | -              | -  | 12:00 – 24:00          | > 37,5            | 11                     |
| 3_0    | Sonntag | 0              | -  | -                      | -                 | 66                     |
| 3_1    | Sonntag | -              | -  | 12:00 – 24:00          | -                 | 14                     |
| 3_2    | Sonntag | -              | -  | 00:00 – 12:00          | < 37,5            | 14                     |
| 3_3    | Sonntag | -              | -  | 00:00 – 12:00          | > 37,5            | 6                      |

Zur Veranschaulichung der Fahrzeugnutzung an den jeweiligen Tagen sind die abgeleiteten Nutzungsprofile in Abbildung 16 bis Abbildung 18 graphisch dargestellt.

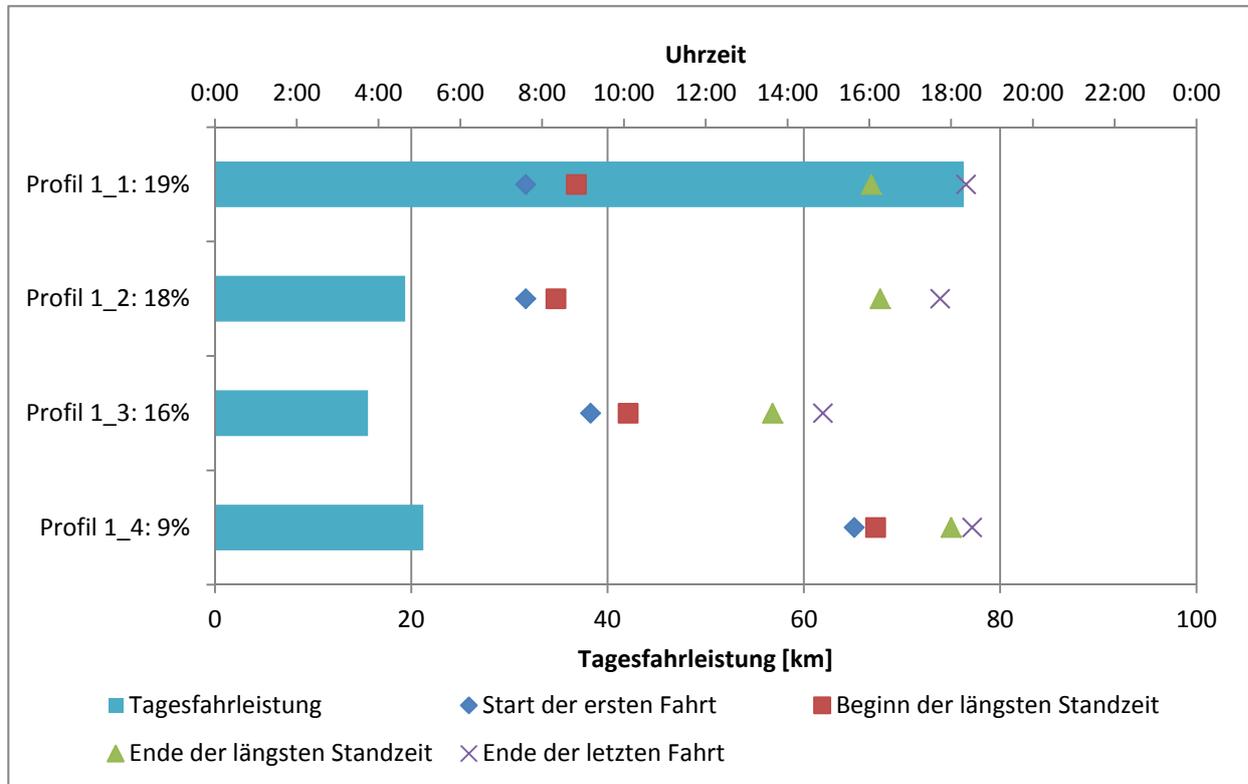


Abbildung 16: Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Werktag

Wie bereits erwähnt, ist die Fahrzeugnutzung an Werktagen maßgeblich durch Fahrten zur Arbeit geprägt. In den beiden Profilen 1\_1 und 1\_2 stehen die Fahrzeuge während der längsten Standzeit des Tages zum großen Teil bei der Arbeitsstelle. Sie stellen somit typische Pendelprofile dar. Im Vergleich zu den anderen beiden ermittelten Profilen 1\_3 und 1\_4, die vor allem Einkaufs-, Freizeit- und Begleitfahrten repräsentieren, beginnt bei diesen Pendelprofilen die erste Fahrt des Tages früher und die längste Standzeit des Tages vergrößert sich auf annähernd acht Stunden. Auffallend ist zudem, dass die Fahrzeuge der Profile 1\_3 und 1\_4 deutlich länger zu Hause abgestellt sind und eine geringe Fahrleistung aufweisen.

Einkaufs- und Freizeitfahrten dominieren die Fahrzeugnutzung an Samstagen. Generell ist zu erkennen, dass die Fahrten an Samstagen im Vergleich zu Werktagen später gestartet werden und die Pkw wieder eher zuhause abgestellt werden. Dadurch verringert sich im Vergleich zu den Pendelprofilen am Werktag die längste Standzeit während der Fahrzeugnutzung erheblich. Mit den Profilen 2\_1 und 2\_3 sind vor allem Fahrten zu Einkaufszwecken abgebildet

und weisen im Vergleich zu den Profilen 2\_2 und 2\_4, mit denen mehrheitlich Fahrten für Freizeitwecke dargestellt sind, eine kürzere Tagesfahrleistung<sup>24</sup> auf.

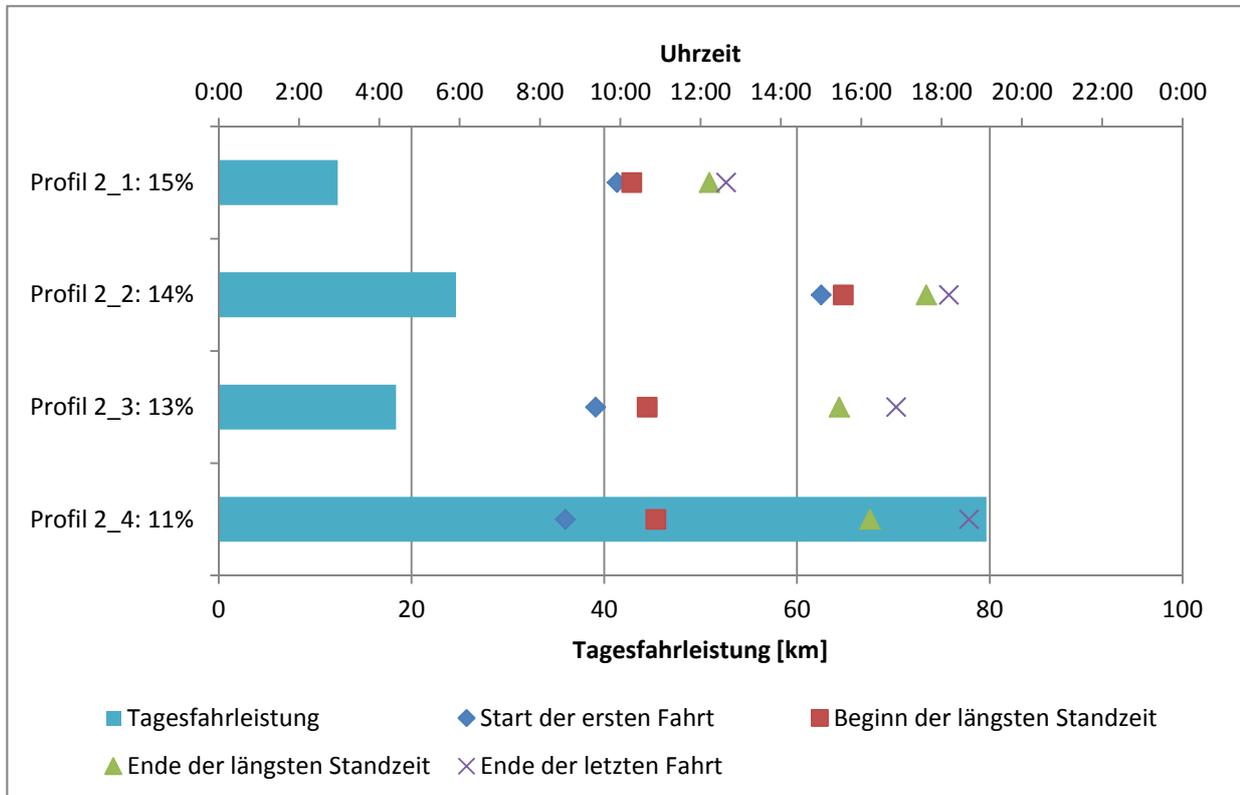


Abbildung 17: Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Samstag

An Sonntagen finden fast ausschließlich Fahrten zu Freizeitwecken und Begleitfahrten statt. Die Änderung der Fahrgründe im Vergleich zu den anderen Tagen wird in der durchschnittlichen Fahrleistung der einzelnen Profile sichtbar, da sich die Tagesfahrleistungen im Vergleich zu den entsprechenden Profilen der anderen Tage erhöhen. Ähnlich wie an Samstagen werden die Pkw „erst“ gegen 9 Uhr morgens gestartet und sind generell nur für kurze Zeit nicht zu Hause abgestellt.

Die in Abbildung 16 bis Abbildung 18 präsentierten Fahrzeugnutzungsprofile für die einzelnen Tage werden nach deren Kombination in Wochennutzungsprofile unter anderem als Eingangsgröße für die Darstellung der zusätzlichen Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge in der Strommarktmodellierung eingesetzt. Da das Strommarktmodell PowerFlex den Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung simuliert, müssen die für die Abbildung der zusätzlichen Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen verwendeten Nutzungsprofile auch in

<sup>24</sup> Dieser Effekt ist übrigens auch in den für die Werkzeuge abgeleiteten Profilen 1\_3 und 1\_4 zu erkennen. In den Daten des Profils 1\_3 ist ein höherer Anteil an Einkaufsfahrten als an Freizeitfahrten hinterlegt, für Profil 1\_4 stellt sich dies in umgekehrter Weise dar. Die Fahrleistung von Profil 1\_4 ist dementsprechend höher als diejenige von Profile 1\_3.

stündlicher Auflösung in das Strommarktmodell integriert werden. Dadurch kann die in den Profilen ermittelte Fahrdauer nicht exakt in der Strommarktmodellierung abgebildet werden und wird daher für die Integration in PowerFlex auf die nächste Stunde gerundet. Die Fahrzeit wird dabei so festgelegt, dass die Fahrt in den Stunden stattfindet, in denen die entsprechende Fahrt in den hier gezeigten Profilen hauptsächlich durchgeführt wird<sup>25</sup>. Zusätzlich wird für die Integration der Fahrzeugnutzungsprofile in PowerFlex angenommen, dass sich die Tagesfahrleistung entsprechend der Fahrdauer auf die beiden in den Profilen abgebildeten Fahrten aufteilt<sup>26</sup>.

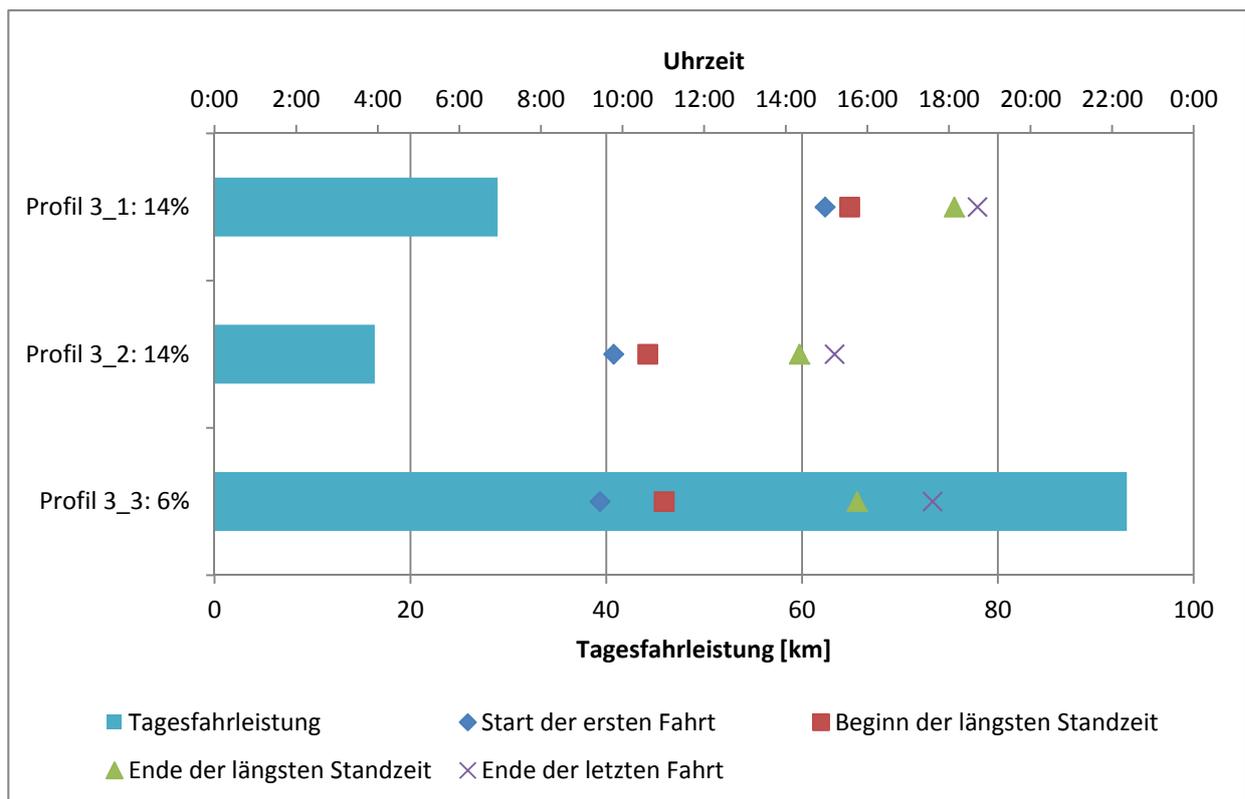


Abbildung 18: Fahrzeugnutzungsprofile für das alltägliche Mobilitätsverhalten am Sonntag

<sup>25</sup> Beispiel 1: Profil 1\_2 weist eine Fahrt von 07:36 – 08:20 auf. Diese Fahrt wird in PowerFlex als eine Fahrt von 07:00 – 08:00 dargestellt.

Beispiel 2: Profil 3\_4 weist eine Fahrt von 09:27 – 11:01 auf. Diese Fahrt wird in PowerFlex als eine Fahrt von 09:00 – 11:00 dargestellt.

<sup>26</sup> Beispiel: Die erste in Profil 1\_1 hinterlegte Fahrt hat eine Dauer von 74 Minuten (48 % der Gesamtfahrdauer des Profils), die zweite Fahrt dauert dagegen 79 Minuten (52 % der Gesamtfahrdauer des Profils). Entsprechend der Verteilung der Fahrdauer wird die Tagesfahrleistung von 76 km zu 48 % auf die erste Fahrt (37 km) und zu 52 % auf die zweite Fahrt (39 km) verteilt.

### 5.3 Integration von Nutzungsprofilen elektrischer Fahrzeuge in die Strommarktmodellierung

Aufgrund von Restriktionen bezüglich der Rechenleistung muss für die Integration der Fahrzeugnutzung in das Strommarktmodell PowerFlex für die einzelnen Typen an Elektrofahrzeugen eine Auswahl an Wochennutzungsprofilen getroffen werden. Insgesamt werden 60 Nutzungsprofile<sup>27</sup> in das Strommarktmodell PowerFlex integriert, wobei batterieelektrische Stadtfahrzeuge (City-BEV) durch zehn, batterieelektrische Pkw (BEV) durch 20 und Plug-In-Hybridfahrzeuge durch 30 Nutzungsprofile in der Strommarktmodellierung repräsentiert werden. Bei der Nutzung elektrischer Fahrzeuge ohne Möglichkeit das Fahrzeug auf dem eigenen Grundstück abzustellen, wird angenommen, dass die Fahrzeuge im öffentlichen Raum beladen werden und somit nach der Ankunft zuhause eine andere Ladeleistung zur Verfügung steht als bei der Ladung auf dem eigenen Grundstück. Somit können Fahrprofile mit und ohne Stellplatz auf dem eigenen Grundstück nicht gemeinsam in PowerFlex integriert werden und stellen jeweils ein eigenes Nutzungsprofil dar. Aus diesem Grund wird für alle Pkw-Typen ein Teil der Nutzungsprofile für die sogenannten „Laternenparker“ reserviert, um die unterschiedlichen Ladeleistungen in der Strommarktmodellierung berücksichtigen zu können.

Als Grundlage für die Auswahl von Nutzungsprofilen, mit denen die Nutzung elektrischer Fahrzeuge möglichst gut beschrieben wird, dient die Betrachtung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens in Bezug auf das Maximalpotenzial, da in dieser Betrachtung jeder einzelne Datensatz und somit jedes hinterlegte Wochennutzungsprofil auf die mögliche Nutzung als elektrisches Fahrzeug analysiert wurde. Somit kann für jeden elektrischen Fahrzeugtyp die relative Verteilung derjenigen Wochennutzungsprofile bestimmt werden, die in der Maximalpotenzialanalyse als elektrische Pkw deklariert wurden.

Durch die Beschränkung auf insgesamt 60 Wochennutzungsprofile entsteht bei jeder Auswahl der Profile eine Verzerrung gegenüber der Abbildung des Mobilitätsverhaltens mit allen Profilen. Durch eine Auswahl der häufigsten Wochennutzungsprofile würde die Fahrzeugnutzung der elektrischen Fahrzeuge an Werktagen über- und am Wochenende unterschätzt werden, da bei einem solchen Vorgehen vor allem Wochennutzungsprofile ohne Fahrten an Werktagen und mit Fahrten am Wochenende nicht berücksichtigt werden würden.

Daher werden in der Auswahl häufig auftretende Wochennutzungsprofile mit Fahrten an allen Wochentagen und ohne Fahrten an Werktagen, dafür aber mit Fahrten am Wochenende speziell behandelt und in der Auswahl bevorzugt berücksichtigt<sup>28</sup>. Über einen Korrekturfaktor wird zudem die Häufigkeit dieser Profile erhöht, um mit den ausgewählten Profilen entsprechend der in Abschnitt 5.2 vorgestellten Fahrzeugnutzung darstellen zu können, dass ein gewisser Teil der Pkw nicht an allen Tagen genutzt wird.

---

<sup>27</sup> Neben der zeitlich aufgelösten Fahrzeugnutzung werden mit den Nutzungsprofilen auch die Energieverbräuche und die Standorte der Fahrzeuge mit an das Strommarktmodell PowerFlex übergeben.

<sup>28</sup> Beispiel: Insgesamt werden batterieelektrische Pkw (BEV) durch 20 Nutzungsprofile repräsentiert. Neun Nutzungsprofile (drei für „Laternenparker“) weisen keine Fahrten am Wochenende auf, sieben Profile (vier für „Laternenparker“) besitzen Fahrten an allen Wochentagen und drei Profile (eins für „Laternenparker“) haben nur Fahrten am Wochenende.

Eine Besonderheit besteht bei den Fahrzeugnutzungsprofilen batterieelektrischer Stadtfahrzeuge, da einige Nutzungsprofile eine Tagesfahrleistung über der maximal nutzbaren Reichweite dieser Fahrzeuge ausweisen. In Fällen, in denen ein Nutzungsprofil mit einer Fahrleistung über der maximal nutzbaren Reichweite batterieelektrischer Stadtfahrzeuge ausgewählt wird, wird die Tagesfahrleistung auf deren maximale, nutzbare Reichweite begrenzt.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert, stellen auch die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge einen Sonderfall dar, da neben der alltäglichen Nutzung weitere unregelmäßige lange Fahrten in die Profile integriert sind. Diese modifizierten Profile entsprechen der Nutzung von Fahrzeugen ohne Reichweitenrestriktion, welche neben regelmäßigen alltäglichen Einsatzmustern auch unregelmäßige Einsatzzwecke, wie beispielsweise Urlaubs- oder Dienstreisen, abbilden.

Anzumerken ist, dass der generelle Anspruch des dargestellten Vorgehens die aggregierte, zeitlich aufgelöste Abbildung der Nutzung der elektrischen Pkw ist. Durch die Auswahl bestimmter Wochennutzungsprofile wird nicht mehr nur von konsistenten Nutzungsprofilen einzelner Fahrzeuge ausgegangen. Ein Fahrprofil mit Fahrten nur am Wochenende – wie es teilweise ausgewählt wird – dürfte in der Realität kein häufiges Nutzungsverhalten für ein einzelnes Fahrzeug darstellen. Durch das vorgestellte Vorgehen ist also angenommen, dass ein einzelnes Fahrzeug an einem Wochentag zu einem Profil, an einem anderen Wochentag zu einem anderen Profil gehören kann, sich alle elektrischen Fahrzeuge allerdings, wie mit den ausgewählten Nutzungsprofilen dargestellt, bewegen.

Die ausgewählten Wochennutzungsprofile bilden somit die Grundlage für die Abbildung der Nutzung batterieelektrischer privat genutzter Fahrzeuge in der Strommarktmodellierung mit PowerFlex. Für die Strommarktmodellierung wird allerdings die Darstellung der Fahrzeugnutzung über ein gesamtes Jahr benötigt, so dass angenommen wird, dass die elektrischen Fahrzeuge über das Jahr dieselben Wochennutzungsmuster besitzen. Zudem werden die so ermittelten Jahresnutzungsmuster entsprechend ihrer relativen Häufigkeit auf die Struktur des elektrischen Fahrzeugbestands (Abschnitt 4.2) angewendet.

Wird in der Strommarktmodellierung von der Batterieladung ohne Lademanagement<sup>29</sup> ausgegangen, lässt sich aus den in den Nutzungsprofilen hinterlegten Fahrten und Standorten die zeitlich aufgelöste, zusätzliche Stromnachfrage durch Elektromobilität problemlos als Input für PowerFlex generieren. Im Falle der Strommarktmodellierung mit Lademanagement<sup>30</sup> für die elektrischen Fahrzeuge ergibt sich die zeitlich aufgelöste Stromnachfrage unter Berücksichtigung der Fahrzeugnutzungsprofile aus der Strommarktsimulation. Daher werden für diese Betrachtung die Energieverbräuche beim Fahren sowie die Standzeiten und –orte, für die mit den Szenarioannahmen eine gewisse maximale Ladeleistung definiert ist, an PowerFlex übergeben.

Da die ausgewählten Nutzungsprofile die Fahrzeugnutzung aller elektrischen Fahrzeuge repräsentieren, lässt sich zudem die für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung benötigte aggregierte

---

<sup>29</sup> Ohne Lademanagement: Die Fahrzeugnutzer verbinden das Fahrzeug nach Fahrtende unverzüglich mit einer Ladestation und die Fahrzeuge werden sofort mit der maximalen Ladeleistung dieser Ladestation geladen.

<sup>30</sup> Die Ladung der Fahrzeuge wird unter Berücksichtigung der Restriktionen durch die Fahrzeugnutzung in preisgünstige Stunden verschoben.

Jahresfahrleistung der drei Typen an Elektrofahrzeugen ableiten. Diese Werte sind in Abschnitt 4.1 in Tabelle 6 für alle Größenklassen differenziert aufgeführt.

## Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor

In diesem Kapitel wird die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchte Interaktion der Elektromobilität mit dem Stromsektor dargestellt. Zunächst werden die Motivation und die grundlegenden Mechanismen des Strommarkts beschrieben. Danach werden das methodische Vorgehen, die zugrunde gelegten Szenarioannahmen und die Ergebnisse vorgestellt.

### 6.1 Motivation

Für die Klimaverträglichkeit von Elektromobilität ist ein entscheidender Faktor, in welchen Kraftwerken der Strom zur Ladung der Batterien produziert wird, denn je nach Energieträger sind mit der Stromproduktion unterschiedlich hohe Treibhausgasemissionen verbunden.

Elektrofahrzeuge sind neue Verbraucher auf dem Strommarkt. Für die Frage, welche Auswirkung ihre Nachfrage auf den Kraftwerkseinsatz und damit auch auf die Treibhausgasemissionen hat, ist nicht nur die Höhe des Verbrauchs relevant, sondern auch seine zeitliche Struktur. Denn je nachdem, in welcher Zeit – und damit in welcher Angebots- und Nachfragesituation – der Verbrauch für die Batterieladung auftritt, kommen unterschiedliche Kraftwerke zum Einsatz, um diesen zusätzlichen Verbrauch zu decken. Welche dies sind, ergibt sich aus den Mechanismen für den Kraftwerkseinsatz auf dem Strommarkt, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

### 6.2 Kraftwerkseinsatz am Strommarkt

Kraftwerke kommen am Strommarkt gemäß einer bestimmten Reihenfolge, der Merit Order, zum Einsatz, in der die Kraftwerke entsprechend ihren kurzfristigen Grenzkosten für die Stromerzeugung geordnet sind. Die kurzfristigen Grenzkosten, also die Kosten, die für das Produzieren einer Kilowattstunde Strom entstehen, bestehen für die konventionellen Kraftwerke hauptsächlich aus den Brennstoff- und gegebenenfalls CO<sub>2</sub>-Kosten und zu einem kleinen Teil aus sonstigen kurzfristigen Kosten für Betrieb und Wartung.

Abbildung 19 zeigt diese Merit Order für das Jahr 2020. Die erneuerbaren Energien gehen mit Grenzkosten von Null Euro ein, da sie vorrangig einspeisen.<sup>31</sup> Nach den erneuerbaren Energien folgen Kernenergie, Braunkohle, Steinkohle und Erdgas, sowie teure Reservekraftwerke auf Erdgas- oder Heizölbasis. Das letzte Kraftwerk, das noch benötigt wird, um die Nachfrage in einer Stunde zu decken, ist das Grenzkraftwerk; seine kurzfristigen Grenzkosten setzen den Strompreis für alle Kraftwerke. Da die Nachfrage von Stunde zu Stunde unterschiedlich hoch ist, ändert sich auch die benötigte Kapazität und damit das Grenzkraftwerk.

---

<sup>31</sup> Im Fall von Wasser, Wind oder Photovoltaik fallen keine Brennstoffkosten an, so dass ihre kurzfristigen Grenzkosten zur Produktion einer Kilowattstunde Strom tatsächlich nahezu Null sind. Für Biomasse sind dagegen Brennstoffkosten zu zahlen, die jedoch durch die Einspeisevergütung kompensiert werden.

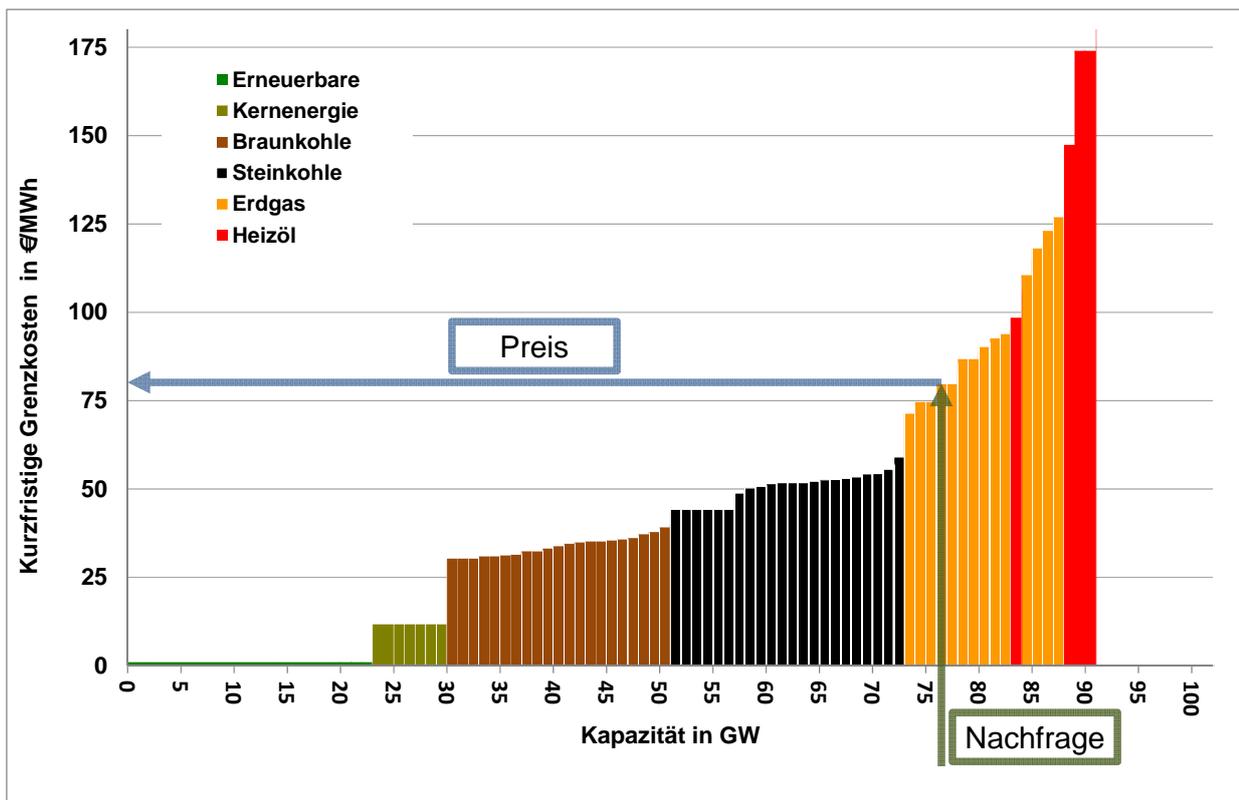


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Merit Order im Jahr 2020, Quelle: ELIAS, PowerFlex

Steigt die Stromnachfrage in einer Stunde, zum Beispiel durch die neu ins System kommenden Elektrofahrzeuge, so kommt die nächstgünstige, noch freie Stromerzeugungskapazität zum Einsatz. Die zeitliche Struktur der Nachfrage ist deshalb für den Kraftwerkseinsatz entscheidend. Dies wirkt sich nicht nur auf die Umweltbilanz der Elektrofahrzeuge aus, sondern auch auf den Strommarkt, zum Beispiel wenn Lastspitzen entstehen, die nur unter hohen Kosten zu decken sind.

## 6.3 Methodisches Vorgehen

### 6.3.1 Grundsätzliche Beschreibung

Um die Interaktionen zwischen Elektrofahrzeugen und Strommarkt detailliert und mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu untersuchen, werden die in diesem Projekt entwickelten Fahrzeugnutzungsprofile (Kapitel 5) in das Strommarktmodell PowerFlex (Abschnitt 6.3.2) eingespeist.

Zur Analyse der Umweltauswirkungen, die der Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge verursacht, wird aus Modellläufen ermittelt, durch welche Kraftwerke der zusätzlich benötigte Strom produziert wird. Dazu wird die Differenz zwischen unterschiedlichen Szenarien mit Elektromobilität und einem Basisszenario ohne Elektromobilität betrachtet: So ergibt sich der Brennstoffmix des zusätzlich produzierten Stroms aus der Differenz der Stromerzeugung aller eingesetzten Brennstoffe jeweils zwischen den Läufen mit Elektrofahrzeugen und dem Basislauf. Ferner wurden die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Differenzbetrachtung ermittelt. Der Emissionsfaktor des zusätzlich produzierten Stroms ergibt sich aus dem

Verhältnis der Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Differenz der Stromproduktion. Dieser Emissionsfaktor wird dann für die Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Effekte von Elektromobilität zugrunde gelegt.

### 6.3.2 Das Strommarktmodell PowerFlex - Modellbeschreibung

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage zu decken. Die zu minimierende Zielfunktion ist die Summe über die im Jahr anfallenden, kurzfristigen Stromerzeugungskosten. Das Modell PowerFlex ist sowohl als lineares als auch als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formuliert und wird gegenwärtig zur Ex-ante-Szenarioanalyse von Ausbaupfaden für erneuerbare Energien, Elektromobilität und Smart Grids sowie zur Ex-post-Bewertung von Politikmaßnahmen, wie z. B. dem europäischen Emissionshandel, eingesetzt.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit individuellem Wirkungsgrad erfasst. In der gemischt-ganzzahligen Modellvariante werden des Weiteren drei Betriebszustände unterschieden: An- und Abfahren, Teillast und Volllast. Neben technologiespezifischen Laständerungsgradienten werden auch die Wirkungsgrade in den einzelnen Betriebszuständen unterschieden.

Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Diese Anlagen können ihre Leistung ohne Berücksichtigung von Lastgradienten ändern. Gleiches gilt für Pumpspeicherkraftwerke, die in Gruppen mit einem vergleichbaren Verhältnis von Speicherkapazität zu installierter elektrischer Leistung zugeordnet werden. Insgesamt setzt sich der thermische Kraftwerkspark aus rund 250 Einzelblöcken und 150 Technologieaggregaten zusammen.

Kraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden als Technologieaggregate im Modell abgebildet und sind somit Teil des thermischen Kraftwerksparks. Ihr Einsatz wird in zukünftigen Szenariojahren als flexibel angenommen. Das zur Verfügung stehende Stromangebot aus Laufwasser, Wind offshore, Wind onshore und Photovoltaik (PV) wird mit Hilfe generischer Einspeiseprofile in stündlicher Auflösung vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge an Wasser-, Wind- und Photovoltaikstrom wird modellendogen bestimmt: Das Modell kann dargebotsabhängige, erneuerbare Energien als überschüssig klassifizieren, sofern ihre Einspeisung die Nachfrage übersteigt.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen. Für jeden Hauptenergieträger ergibt sich somit ein individuelles KWK-Profil. Für sogenannte must-run-Kraftwerke, die vom Strommarkt unabhängig operieren, wie z. B. Gichtgas-Kraftwerke oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt.

Die Stromnachfrage wird wie zur fluktuierenden Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien in stündlicher Auflösung vorgegeben. Das Nachfrageprofil setzt sich aus der Netzlast und einer angenommenen Gleichverteilung der Industriestromnachfrage zusammen. Die Bereitstellung

von Regelleistung wird durch Vorgabe einer ganzjährigen Sockellast thermischer Kraftwerke in Höhe von 14 GW abgebildet.

Eine zentrale Modellanwendung ist die Abbildung verschiedener Flexibilitäten auf der Nachfrageseite durch Speicher oder flexible Verbraucher. Als flexible Verbraucher können beispielsweise Prozesse mit einem thermischen Speicher, wie z. B. Geräte zur elektrischen Kälte- und Wärmebereitstellung, oder Verbraucher mit einem zeitvariablen Einsatz modelliert werden. Diese wurden im Rahmen dieses Projekts um die Abbildung von Elektrofahrzeugen ohne und mit Lademanagement ergänzt (s. Abschnitt 6.3.3).

Der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Pumpspeicherkraftwerken wird auf Basis einer vollständigen Voraussicht unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen, wie zum Beispiel Deckung der Last, Bereitstellung von KWK-Wärme oder Regelleistung, bestimmt.

Das Optimierungsproblem ist in GAMS<sup>32</sup> implementiert und wird mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst. Es besteht in der linearen Variante bei einem ganzjährigen Optimierungszeitraum (8.760 Zeitschritte) aus circa 2,5 Mio. Variablen, in der gemischt-ganzzahligen Variante sind es bei einer day-ahead-Optimierung rund 15.000 binäre Variablen je Optimierungszeitraum (365 Optimierungszeiträume mit je 24 Zeitschritten).

Als Modellergebnisse werden basierend auf dem stundenscharfen Kraftwerkseinsatz der dazugehörige Brennstoffmix, die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und der daraus resultierende Strompreis ausgegeben. Darüber hinaus können je nach Fragestellung weitere Modellergebnisse, wie z. B. die Menge nicht genutzter fluktuierender Stromerzeugung oder die Einsatzprofile, Benutzungsstunden und Deckungsbeiträge von thermischen Kraftwerken, Speichern und Flexibilitätsoptionen, dargestellt und ausgewertet werden.

### 6.3.3 Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Modul zur detaillierten Abbildung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Stromerzeugung für das PowerFlex-Modell entwickelt. Damit kann eine große Anzahl verschiedener Fahrzeugnutzungsprofile (zurzeit rund 60) im Modell stundenscharf verarbeitet werden. Dies erlaubt die Abbildung detaillierter Inputdaten für die Elektromobilität. Im Modul E-Mobilität sind sowohl reine batterieelektrische Fahrzeuge als auch Plug-In-Hybridfahrzeuge, die einen Teil ihres Energiebedarfs durch Kraftstoff decken können, implementiert.

Der Stromverbrauch für die Batterieladung der Fahrzeuge kann ohne Lademanagement (ungesteuert) oder mit Lademanagement (preisoptimiert gesteuert) in die Modellierung des Strommarkts integriert werden. Im ungesteuerten Fall ist die Nachfrage der Fahrzeuge ein fest vorgegebenes Profil, das zur bisherigen Stromnachfrage hinzukommt.

In Fall des Ladens mit Lademanagement werden pro Fahrzeugnutzungsprofil zwei Zeitreihen an das Strommarktmodell übergeben: der Verbrauch im Fahrzeug beim Fahren und die in jeder Stunde zur Ladung verfügbare maximale Anschlussleistung. Die durchgeführten Fahrten sind dabei dieselben wie im Fall ohne Lademanagement.

---

<sup>32</sup> General Algebraic Modeling System

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die in der Modellierung der batterieelektrischen Pkw und der Plug-In-Hybridfahrzeuge im Fall des Lademanagements implementierten Nebenbedingungen. Für batterieelektrische Fahrzeuge kann das Modell die in Abbildung 20 dargestellten Größen Ladeleistung und Batteriefüllstand zu jedem Zeitpunkt bestimmen. Dabei ist die dargestellte Bilanzgleichung für die Batterie einzuhalten, nach der sich der Batteriefüllstand zu einem Zeitpunkt aus der Differenz des Energieflusses in die Batterie (Ladeleistung\*Ladewirkungsgrad) und dem Energiefluss aus der Batterie (Verbrauch des Autos beim Fahren) sowie dem Batteriefüllstand im vorigen Zeitschritt ergibt. Die Ladeleistung ist dabei beschränkt durch die zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Anschlussleistung und durch die Bedingung, dass während des Fahrens nicht geladen werden kann.

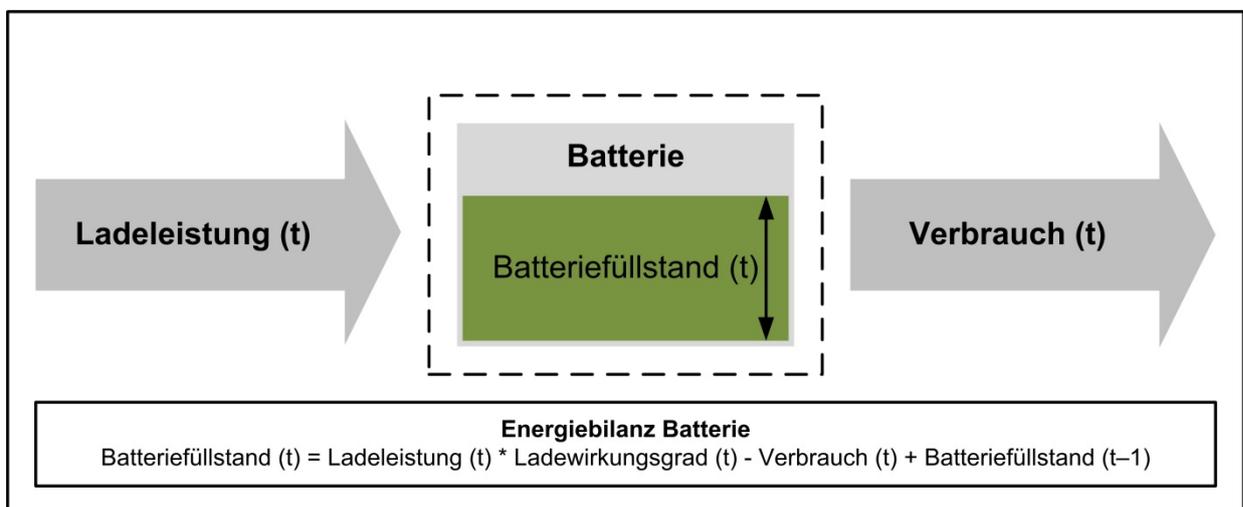


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Modellierung batterieelektrischer Pkw im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex

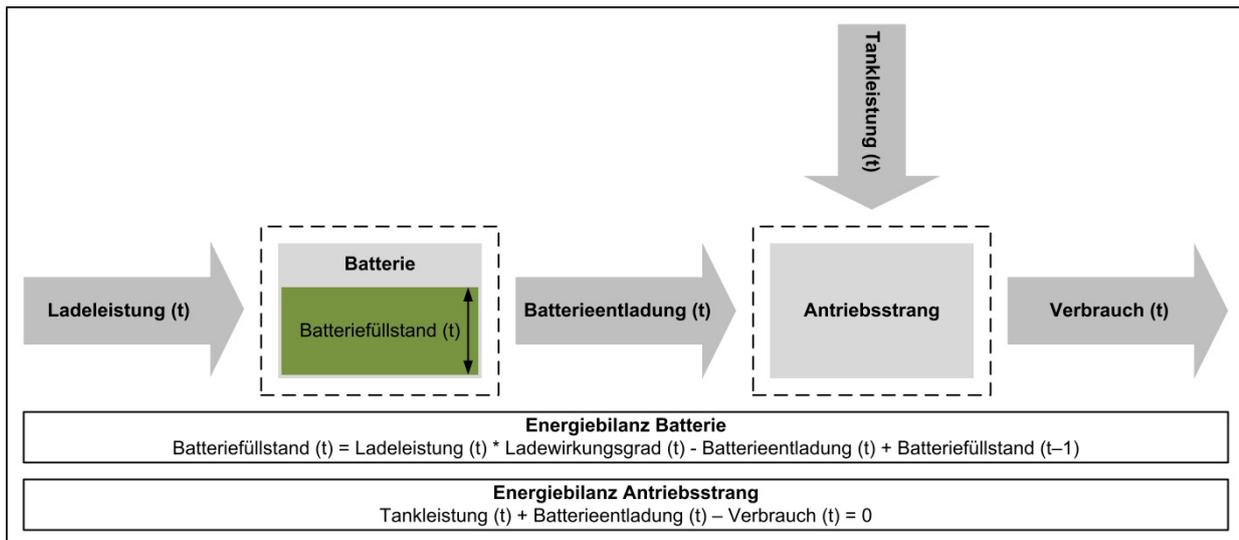


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Modellierung von Plug-In-Hybridfahrzeugen im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex

Für die Plug-In-Hybridfahrzeuge gelten zwei Bedingungen: Zum einen gilt eine ähnliche Bilanzgleichung um die Batterie wie für batterieelektrische Fahrzeuge. Der Strom, der die Batterie verlässt (Batterieentladung) entspricht hier jedoch nicht genau dem vorgegebenen Verbrauch zum Antrieb der Räder, sondern dieser kann entweder aus der Batterieentladung oder aus einer ebenfalls vom Modell bestimmbaren Tankleistung gedeckt werden. Da diese Tankleistung im Modell wiederum mit hohen Kosten behaftet ist, wird jedoch das elektrische Laden, wann immer es möglich ist, vorgezogen.

Die Optimierungsaufgabe ist weiterhin die Minimierung der kurzfristigen Stromerzeugungskosten, wobei nun auch Strom für die Ladung der Fahrzeugbatterien produziert werden muss. Gleichzeitig muss das Modell die in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellten Restriktionen für die Fahrzeuge einhalten: Für den zeitlich vorgegebenen Energieverbrauch der Fahrzeuge beim Fahren muss der Füllstand der Batterie ausreichen. Das Modell kann über die Höhe des Batteriefüllstands in jeder Stunde entscheiden, indem es über die Ladeleistung in jeder Stunde (im Rahmen der in jeder Stunde verfügbaren Anschlussleistung) entscheidet. Die Ladeleistung ist wiederum ein – zeitlich variabler – Teil der Stromnachfrage, die mit dem Optimierungskalkül zu möglichst niedrigen Kosten gedeckt werden soll. Dies führt dazu, dass das Lademanagement die Ladung der Batterien in Stunden mit möglichst niedrigen Stromerzeugungskosten verschiebt.

Abbildung 22 zeigt die beschriebenen Input- und Output-Größen für die Strommarktmodellierung inklusive der Abbildung der Elektromobilität im Überblick.

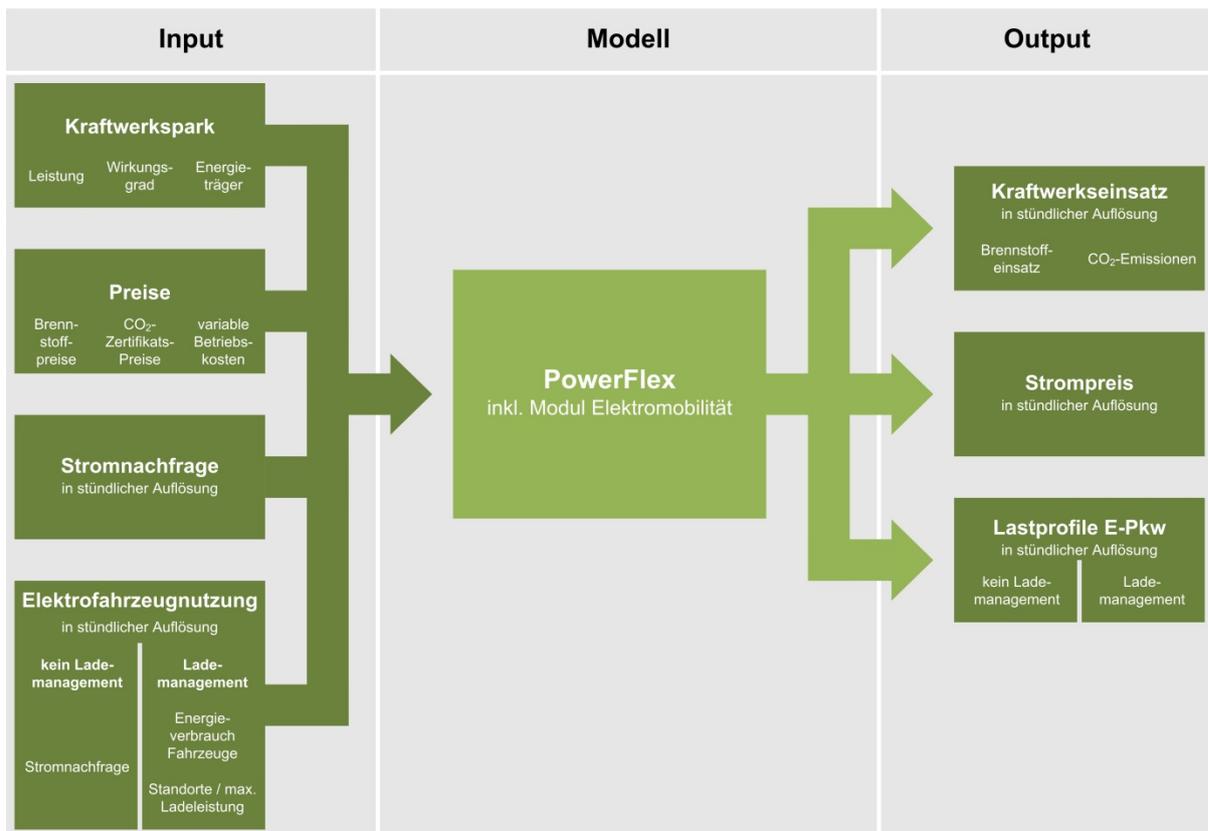


Abbildung 22: Schematische Darstellung von Input- und Output-Größen der Strommarktmodellierung mit PowerFlex und dem Modul Elektromobilität

## 6.4 Szenarioannahmen

### 6.4.1 Szenariodefinition

Im Rahmen der Strommarktmodellierungen wird die Interaktion von Kraftwerkspark und Elektrofahrzeugen für die Szenariojahre 2020 und 2030 abgebildet. Dabei werden die folgenden Szenarien betrachtet: Für beide Szenariojahre wird ein Basisszenario ohne Elektromobilität sowie verschiedene Szenarien mit Elektrofahrzeugen modelliert. Die Rechenläufe mit Elektrofahrzeugen wurden mit und ohne Lademanagement durchgeführt. Um mögliche Entwicklungen der Ladeverhaltens zu unterscheiden, wurden außerdem zwei verschiedene Ladeszenarien modelliert: das Laden nach der letzten Fahrt am Wohnort, hauptsächlich abends (Ladeszenario 1), und das Laden auch tagsüber, zum Beispiel am Arbeitsplatz (Ladeszenario 2) (siehe Kapitel 5).

In weiteren Szenarien wurden dem Modell zusammen mit der Elektromobilität zusätzliche erneuerbare Energien zur Verfügung gestellt, die rechnerisch den jährlichen Verbrauch der Elektrofahrzeuge decken können. Diese Rechenläufe mit zusätzlichen erneuerbaren Energien wurden in drei verschiedenen Varianten durchgeführt: mit erneuerbarem Strom aus Wind-onshore-Anlagen, aus Photovoltaikanlagen und aus Biogasanlagen.

Für die Szenariojahre 2020 und 2030 wurden damit insgesamt jeweils 17 Modellläufe durchgeführt (Tabelle 9). Wegen der großen Anzahl der Modellläufe und dem geringen

Einfluss auf die hier untersuchten Größen Brennstoffmix und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor, wurde die als lineares Optimierungsproblem formulierte Modellvariante verwendet.

Tabelle 9: Überblick über die durchgeführten Modellläufe

| <b>Modellläufe 2020 und 2030</b>              |  |                    |   |                    |
|---|--|--------------------|---|--------------------|
|   | <b>Ladeszenario 1<br/>(nach letzter Fahrt)</b> |                    | <b>Ladeszenario 2<br/>(auch tagsüber)</b> |                    |
|   | <b>ohne LM</b>                                 | <b>mit LM</b>      | <b>ohne LM</b>                            | <b>mit LM</b>      |
| <b>ohne Elektromobilität</b>                  | Basislauf                                      |                    |   |                    |
| <b>mit Elektromobilität</b>                   | ohne LM 1                                      | mit LM 1           | ohne LM 2                                 | mit LM 2           |
| <b>mit Elektromobilität plus Wind onshore</b> | ohne LM 1<br>Wind                              | mit LM 1<br>Wind   | ohne LM 2<br>Wind                         | mit LM 2<br>Wind   |
| <b>mit Elektromobilität plus Photovoltaik</b> | ohne LM 1<br>PV                                | mit LM 1<br>PV     | ohne LM 2<br>PV                           | mit LM 2<br>PV     |
| <b>mit Elektromobilität plus Biogas</b>       | ohne LM 1<br>Biogas                            | mit LM 1<br>Biogas | ohne LM 2<br>Biogas                       | mit LM 2<br>Biogas |

(LM = Lademanagement)

Im Folgenden werden die Annahmen für die Inputgrößen in allen betrachteten Szenarien im Einzelnen dargestellt.

#### 6.4.2 Kraftwerkspark

Der konventionelle Teil des Kraftwerksparks, der für die Jahre 2020 und 2030 als Input für das PowerFlex-Modell dient, wurde mit dem Kraftwerksinvestitionsmodell ELIAS berechnet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Elektrische Nettoleistung konventioneller Kraftwerke nach Brennstoffen in den betrachteten Szenariojahren

|  | 2020 | 2030 |
|--|------|------|
|  | GW   |      |
| Kernenergie                              | 8,2  | 0,0  |
| Braunkohle                               | 23,1 | 23,1 |
| <i>davon neue Kondensations-KW</i>       | 3,1  | 3,1  |
| <i>davon neue Kondensations-KW (CCS)</i> | 0,0  | 0,0  |
| <i>davon alte Kondensations-KW</i>       | 17,8 | 17,8 |
| <i>davon alte KWK</i>                    | 2,2  | 2,2  |
| Steinkohle                               | 24,8 | 24,1 |
| <i>davon neue Kondensations-KW</i>       | 6,3  | 6,3  |
| <i>davon neue Kondensations-KW (CCS)</i> | 0,0  | 0,0  |
| <i>davon neue KWK</i>                    | 0,0  | 0,0  |
| <i>davon alte Kondensations-KW</i>       | 14,1 | 14,1 |
| <i>davon alte KWK</i>                    | 4,4  | 3,8  |
| Erdgas                                   | 16,6 | 13,1 |
| <i>davon neue Kondensations-KW</i>       | 2,0  | 2,0  |
| <i>davon neue Kondensations-KW (CCS)</i> | 0,0  | 0,0  |
| <i>davon neue KWK</i>                    | 0,0  | 0,0  |
| <i>davon alte Kondensations-KW</i>       | 2,8  | 2,7  |
| <i>davon alte KWK</i>                    | 11,8 | 8,4  |
| Sonstige                                 | 10,8 | 10,7 |

Quelle: ELIAS (Öko-Institut)

Erneuerbare Energien im Kraftwerkspark basieren auf der Leitstudie des BMU [4]. Dabei wurden die Angaben für den Basislauf ohne Elektromobilität um den Anteil der erneuerbaren Energien, der in der Leitstudie für Elektrofahrzeuge vorgesehen ist, bereinigt. Die in der Leitstudie angegebenen Angaben in brutto wurden in netto umgerechnet.

Tabelle 11 zeigt die verwendeten Leistungen und Stromproduktionen aus erneuerbaren Energien in den Basisläufen ohne Elektromobilität.

Tabelle 11: Nettoleistung und Nettostromproduktion der erneuerbaren Energien im Basislauf ohne Elektromobilität in den betrachteten Szenariojahren

|                      | 2020                      |                                   | 2030                      |                                   |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|                      | Leistung<br>(netto)<br>GW | Stromproduktion<br>(netto)<br>GWh | Leistung<br>(netto)<br>GW | Stromproduktion<br>(netto)<br>GWh |
| Laufwasser           | 4,53                      | 21.522                            | 4,71                      | 22.407                            |
| Wind onshore         | 35,14                     | 74.244                            | 36,52                     | 83.994                            |
| Wind offshore        | 9,83                      | 31.964                            | 24,13                     | 91.678                            |
| PV                   | 51,04                     | 43.341                            | 61,00                     | 55.180                            |
| Biogas               | 2,97                      | 18.539                            | 3,23                      | 20.702                            |
| Deponiegas / Klärgas | 0,24                      | 1.353                             | 0,24                      | 1.334                             |
| Pflanzenöl           | 0,24                      | 1.343                             | 0,24                      | 1.365                             |
| feste Biomasse       | 3,21                      | 18.993                            | 3,69                      | 22.110                            |
| biogener Abfall      | 1,32                      | 4.558                             | 1,30                      | 4.475                             |
| Geothermie           | 0,21                      | 1.173                             | 0,70                      | 4.561                             |

Quelle: [4], eigene Berechnungen

Für die Läufe mit zusätzlichen erneuerbaren Energien wurde dem Modell jeweils zusätzliche Stromerzeugung aus Wind onshore und Photovoltaik bzw. zusätzliche Kapazität auf Basis von Biogas zur Verfügung gestellt. Dabei entspricht diese Stromerzeugung jeweils genau dem Jahresverbrauch der Elektrofahrzeuge. Die zusätzlichen erneuerbaren Energien für Ladeszenario 1 (Laden nach letzter Fahrt) und Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber) unterscheiden sich dabei leicht, da in Ladeszenario 2 die Plug-In-Hybridfahrzeuge durch die häufiger zur Verfügung stehende Ladeinfrastruktur einen höheren elektrischen Fahranteil erreichen können und somit die Stromnachfrage höher ist als im Ladeszenario 1. Einen Überblick über die zusätzlichen erneuerbaren Energien geben Tabelle 12 und Tabelle 13. Bei Wind onshore und Photovoltaik handelt es sich dabei um die maximal zur Verfügung stehende zusätzliche Stromproduktion, denn das Modell kann nicht nutzbare fluktuierende erneuerbare Energien als „überschüssig“ deklarieren, sofern das Angebot an erneuerbaren Energien die Nachfrage übersteigt.

Tabelle 12: Erhöhte Stromproduktion aus Wind und Photovoltaik in den Szenarien mit zusätzlichem Wind- bzw. Solarstrom

| Erhöhte Stromproduktion<br>in GWh aus  | 2020   |   | 2030   |   |
|--|--|---|--|---|
|  | Ladeszenario<br>1<br>(nach letzter<br>Fahrt) | Ladeszenario<br>2<br>(auch<br>tagsüber) | Ladeszenario<br>1<br>(nach letzter<br>Fahrt) | Ladeszenario<br>2<br>(auch<br>tagsüber) |
| Wind onshore                           | 75.112                                       | 75.339                                  | 92.856                                       | 95.091                                  |
| <b>Steigerung gegenüber Basisfall:</b> | 1,2 %  | 1,5 %                                   | 10,6 %                                       | 13,2 %                                  |
| PV                                     | 44.209                                       | 44.435                                  | 64.042                                       | 66.276                                  |
| <b>Steigerung gegenüber Basisfall:</b> | 2,0 %  | 2,5 %                                   | 16,1 %                                       | 20,1 %                                  |

Tabelle 13: Erhöhte Kapazität und Stromproduktion aus Biogas in den Szenarien mit zusätzlichen Biogasanlagen

| Erhöhte Leistung in GW/<br>Stromproduktion in GWh<br>aus Biogas | 2020   |   | 2030   |   |
|---|--|---|--|---|
|   | Ladeszenario<br>1<br>(nach letzter<br>Fahrt) | Ladeszenario<br>2<br>(auch<br>tagsüber) | Ladeszenario<br>1<br>(nach letzter<br>Fahrt) | Ladeszenario<br>2<br>(auch<br>tagsüber) |
| <b>Leistung</b>   | 3,11   | 3,14                                    | 4,61   | 4,95                                    |
| <b>Stromproduktion</b>  | 19.407                                       | 19.633                                  | 29.564                                       | 31.799                                  |
| <b>Steigerung gegenüber Basisfall:</b>                          | 4,7 %  | 6,0 %                                   | 42,8 %                                       | 53,6 %                                  |

#### 6.4.3 Kosten für Brennstoffe, Importstrom und CO<sub>2</sub>-Preise

Für die Berechnung des Kraftwerkseinsatzes mit PowerFlex wurden für 2020 und 2030 die in Tabelle 14 dargestellten Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise aus dem laufenden Projekt „Politiksznarien VI“ [17] zugrunde gelegt.

Tabelle 14: Verwendete Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Preise

|   | 2020  | 2030  |
|---|-------|-------|
| <b>Brennstoffpreise in €(2008) / MWh</b>    |       |       |
| Uran  | 3,50  | -     |
| Braunkohle                                  | 4,40  | 4,69  |
| Steinkohle                                  | 13,52 | 14,89 |
| Erdgas                                      | 39,49 | 46,92 |
| Heizöl leicht                               | 64,60 | 76,72 |
| Heizöl schwer                               | 41,03 | 48,96 |
| <b>CO<sub>2</sub>-Preise in €(2008) / t</b> | 20    | 30    |

Quelle: Politiksznarien VI [17]

Importstrom ist in der Modellierung mit Kosten, die 1 ct/MWh über den kurzfristigen Grenzkosten des teuersten inländischen Kraftwerk liegen, abgebildet, so dass inländische Kraftwerke die Stromnachfrage weitgehend decken und Importstrom nur als Leistungsreserve verwendet wird.

#### 6.4.4 CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden brennstoffbezogene CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren aus der Datenbank GEMIS 4.7 [18] verwendet, wobei sowohl die direkten Emissionen, als auch die Emissionen aus vorgelagerten Prozessen wie Brennstoffextraktion und Anlagenbau berücksichtigt werden.

Tabelle 15: Inputbezogene Emissionsfaktoren für die in der Modellierung verwendeten Energieträger

| Inputbezogener<br>CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor<br>in g/kWh <sub>Brennstoff</sub> | 2020   |             | 2030   |             |
|--|--------|-------------|--------|-------------|
|  | direkt | vorgelagert | direkt | vorgelagert |
| Braunkohle   | 414,62 | 9,84        | 414,62 | 9,45        |
| Steinkohle   | 347,78 | 26,74       | 347,78 | 25,88       |
| Erdgas   | 201,53 | 18,07       | 201,50 | 21,23       |
| Heizöl leicht  | 267,93 | 41,82       | 267,99 | 41,36       |
| Heizöl schwer  | 285,69 | 39,67       | 285,69 | 38,90       |
| Hochofengas  | 378,71 | 6,17        | 378,71 | 6,04        |
| Raffineriegas  | 216,02 | 37,40       | 216,02 | 37,22       |
| Kokereigas   | 378,71 | 6,17        | 378,71 | 6,04        |
| Grubengas  | 198,34 | 6,17        | 198,34 | 6,04        |
| Müll fossil  | 10,52  | 0,00        | 10,52  | 0,00        |
| AKW (Uran)   | 0,00   | 12,84       | 0,00   | 12,64       |
| Geothermie   | 0,00   | 60,69       | 0,00   | 38,19       |
| Photovoltaik   | 0,00   | 75,29       | 0,00   | 65,57       |
| Laufwasser   | 0,00   | 37,01       | 0,00   | 36,19       |
| Wind onshore   | 0,00   | 21,81       | 0,00   | 21,36       |
| Wind offshore  | 0,00   | 21,10       | 0,00   | 20,65       |
| Feste Biomasse   | 0,00   | 2,51        | 0,00   | 2,10        |
| Pflanzenöl   | 0,00   | 47,13       | 0,00   | 50,58       |
| Biogas   | 0,00   | 65,04       | 0,00   | 65,65       |
| Klärgas  | 0,00   | 0,0006      | 0,00   | 0,0006      |
| Deponiegas   | 0,00   | 0,0008      | 0,00   | 0,0008      |
| Müll biogen  | 0,00   | 4,38        | 0,00   | 4,21        |

Quelle: GEMIS 4.7 [18]

#### 6.4.5 Stromnachfrage

Der jährliche inländische Nettostromverbrauch wurde für 2020 mit 586 TWh und für 2030 mit 593 TWh gemäß [19] angenommen. Für das Nachfrageprofil in stündlicher Auflösung wurden historische Daten für den Stromverbrauch [20] verwendet und entsprechend skaliert.

#### 6.4.6 Elektrofahrzeuge

Für die Szenariojahre 2020 und 2030 wurde eine Flotte von Elektrofahrzeugen bestehend aus batterieelektrischen und Plug-In-Hybridfahrzeugen im Strommarktmodell abgebildet, die gemäß verschiedener Nutzungsprofile (siehe Kapitel 5) eingesetzt werden. Insgesamt werden 540.000 Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 und 5.870.000 Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 angenommen, wobei Plug-In-Hybride den größten Teil der Fahrzeuge stellen. Ihr

Stromverbrauch beträgt insgesamt im Jahr 2020 rund 1 TWh und damit unter 0,2 % der gesamten jährlichen Nettostromnachfrage. Im Jahr 2030 sind es je nach Ladeszenario zwischen 9 und 11 TWh, was 1,5 bis 1,8 % des Nettostromverbrauchs entspricht.

## 6.5 Ergebnisse

### 6.5.1 Kraftwerkseinsatz in stundenscharfer Darstellung

Im Folgenden werden die Modellierungsergebnisse für den Kraftwerkseinsatz und die Auswirkungen der Elektromobilität zunächst qualitativ für eine ausgewählte Woche in stundenscharfer Darstellung und beispielhaft für vier Modellläufe (vgl. Abschnitt 6.4.1) vorgestellt. Zuerst wird das Basisszenario ohne Elektromobilität diskutiert, es folgen zwei Läufe mit Elektromobilität ohne und mit Lademanagement („ohne LM 2“ und „mit LM 2“), sowie ein weiterer Modelllauf, in dem Elektromobilität und zusätzliche Windeinspeisung („mit LM2 Wind“) abgebildet werden.

Abbildung 23 zeigt den Kraftwerkseinsatz nach verschiedenen Energieträgern im Basislauf ohne Elektromobilität für eine Oktoberwoche im Jahr 2030. Der ausgewählte Zeitraum zeigt verschiedene mögliche Zustände im Kraftwerkspark: Er beginnt mit dem Wochenende mit niedrigerer Stromnachfrage, hier treten auch Stunden mit Überschüssen an erneuerbaren Energien auf (schraffiert dargestellt). Mit nachlassender erneuerbarer Einspeisung steigt dann der Einsatz konventioneller Kraftwerke im Laufe der Woche bei hoher Nachfrage an, bis auch vereinzelt teure Reservekraftwerke zum Einsatz kommen.

Negative Werte auf der vertikalen Achse entsprechen dem Verbrauch der Pumpspeicherkraftwerke. Wo diese, gesteuert vom Optimierungskalkül des Modells, Strom nachfragen, unterscheidet sich die exogen vorgegebene Stromnachfrage (dünnere Linie) von der insgesamt produzierten Strommenge („Erzeugung insgesamt“, dickere Linie).

Sichtbar wird auch die im Modell vorgegebene Restriktion, dass für die Bereitstellung von Primärregelleistung stets eine thermische Kraftwerksleistung von 14 GW verfügbar sein muss, wobei dazu auch Kraftwerke auf Biomassebasis zählen. Zusammen mit den must-run-Kapazitäten ergibt sich dadurch eine Leistung von knapp 18 GW, die in der dargestellten Woche am Sonntag und Montag nicht weiter reduziert werden kann, obwohl noch fluktuierende erneuerbare Energien vorhanden wären; deshalb kommt es zu erneuerbaren Stromüberschüssen (schraffiert dargestellt).

Dabei ist dem Modell die Reihenfolge, in der es die fluktuierenden erneuerbaren Energien einsetzt, vorgegeben. Denn theoretisch sind die erneuerbaren Energien mit Null Euro Grenzkosten alle gleich günstig, so dass das Modell in Überschuss-Situationen von einer Stunde zur nächsten unterschiedliche erneuerbare Einspeisung als „überschüssig“ klassifizieren würde. Stattdessen werden unter den fluktuierenden erneuerbaren Energien bevorzugt Laufwasser, dann Photovoltaik (PV), danach Wind onshore und zuletzt Wind offshore eingesetzt. Das führt dazu, dass die als „überschüssig“ gekennzeichnete Einspeisung (s. Abbildung 23) in den dargestellten Ergebnissen aus offshore Windkraftanlagen stammt. Solcher nicht integrierter, überschüssiger Strom aus einzelnen erneuerbaren Energien ist jedoch als Überschuss der Summe aller in dieser Stunde verfügbaren fluktuierenden erneuerbaren Energien zu interpretieren.

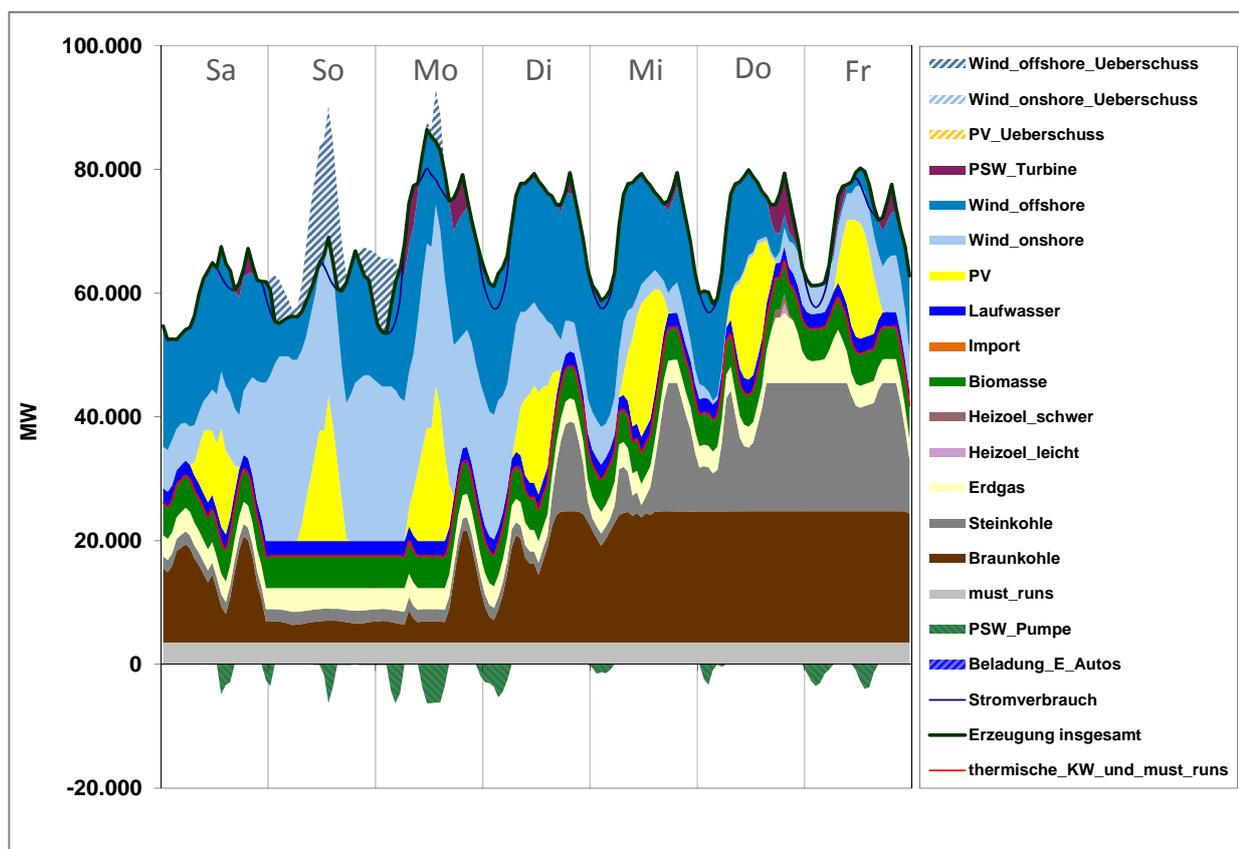


Abbildung 23: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – Basisszenario ohne Elektromobilität

Abbildung 24 zeigt den Kraftwerkseinsatz in einem Modelllauf mit Elektrofahrzeugen, deren Stromverbrauch neben dem Verbrauch der Pumpspeicherkraftwerke als negativer Wert auf der vertikalen Achse dargestellt ist. In diesem Fall werden die Fahrzeuge mit einem festen Nachfrageprofil entsprechend dem Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber) ohne Lademanagement geladen. Erkennbar sind deutliche Nachfragespitzen, die insbesondere am Abend auftreten, wenn auch im Basislauf ohne Elektromobilität die Stromnachfrage hoch ist. Dies führt auf der Erzeugungsseite zu einem Anstieg der Stromerzeugung aus Reservekraftwerken auf Heizölbasis und zu Stromimporten (rot markiert).

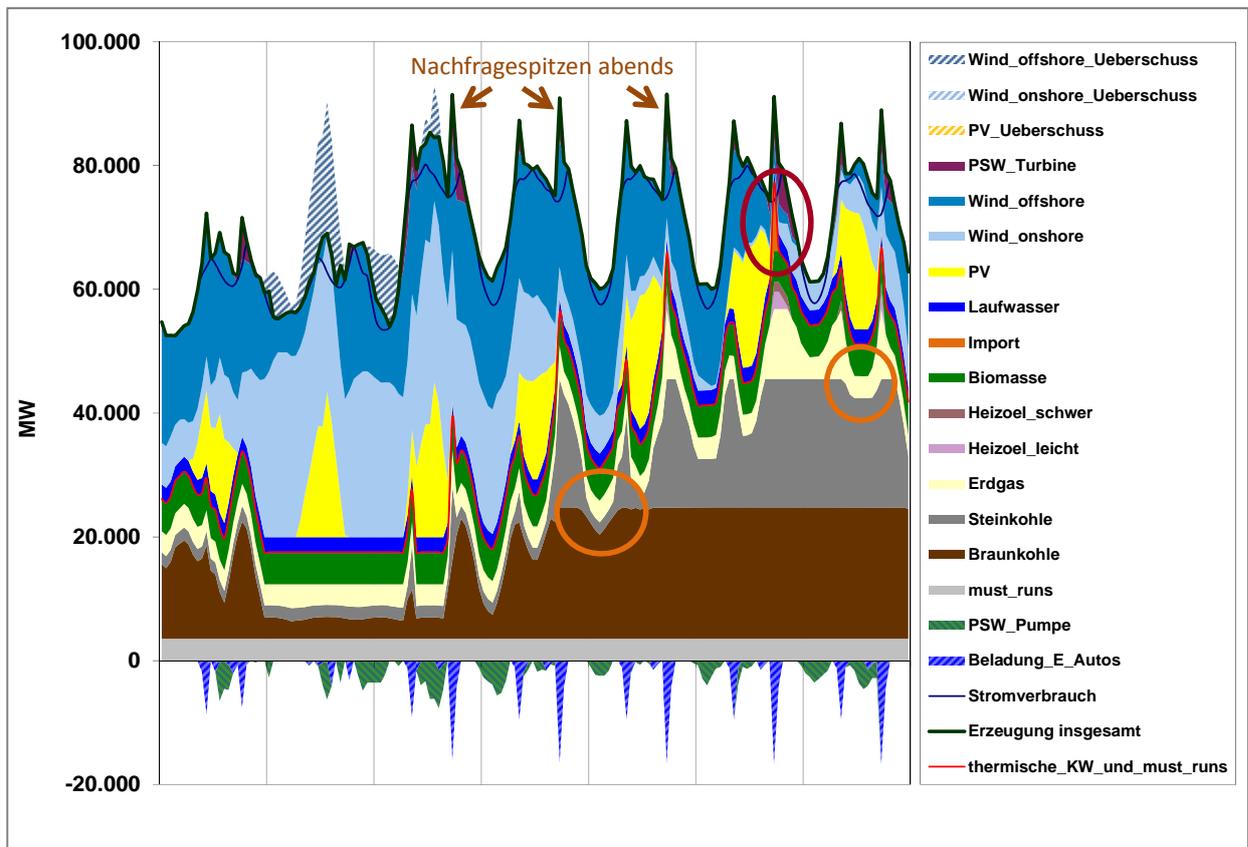


Abbildung 24: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), ohne Lademanagement („ohne LM 2“)

Die Wirkung des preisoptimierten Lademanagements zeigt sich in Abbildung 25. Die Stromnachfrage für das Laden der Elektrofahrzeuge ist nun in andere Stunden verschoben worden, so dass die Nachfragespitzen am Abend aus Abbildung 24 hier vollständig verschwunden sind. Das Laden der Fahrzeuge findet nun bevorzugt in Stunden statt, in denen zuvor die Pumpspeicherkraftwerke Strom nachgefragt haben, weil in diesen Stunden die Stromerzeugung besonders günstig ist.

Von der zuvor überschüssigen, fluktuierenden Stromeinspeisung kann ein Teil nun zur Ladung der Fahrzeugbatterien genutzt werden, wie die in Abbildung 25 sichtbare, gestiegene Nachfrage bei Überschuss zeigt. In den Zeiträumen ohne überschüssiges erneuerbares Energieangebot wird die Nachfrage der Fahrzeuge bevorzugt in die Nachttäler verschoben. In diesen Stunden steigt insbesondere die Stromerzeugung aus Braun- oder Steinkohle, wie sich im Vergleich der orange markierten Bereiche in Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigt.

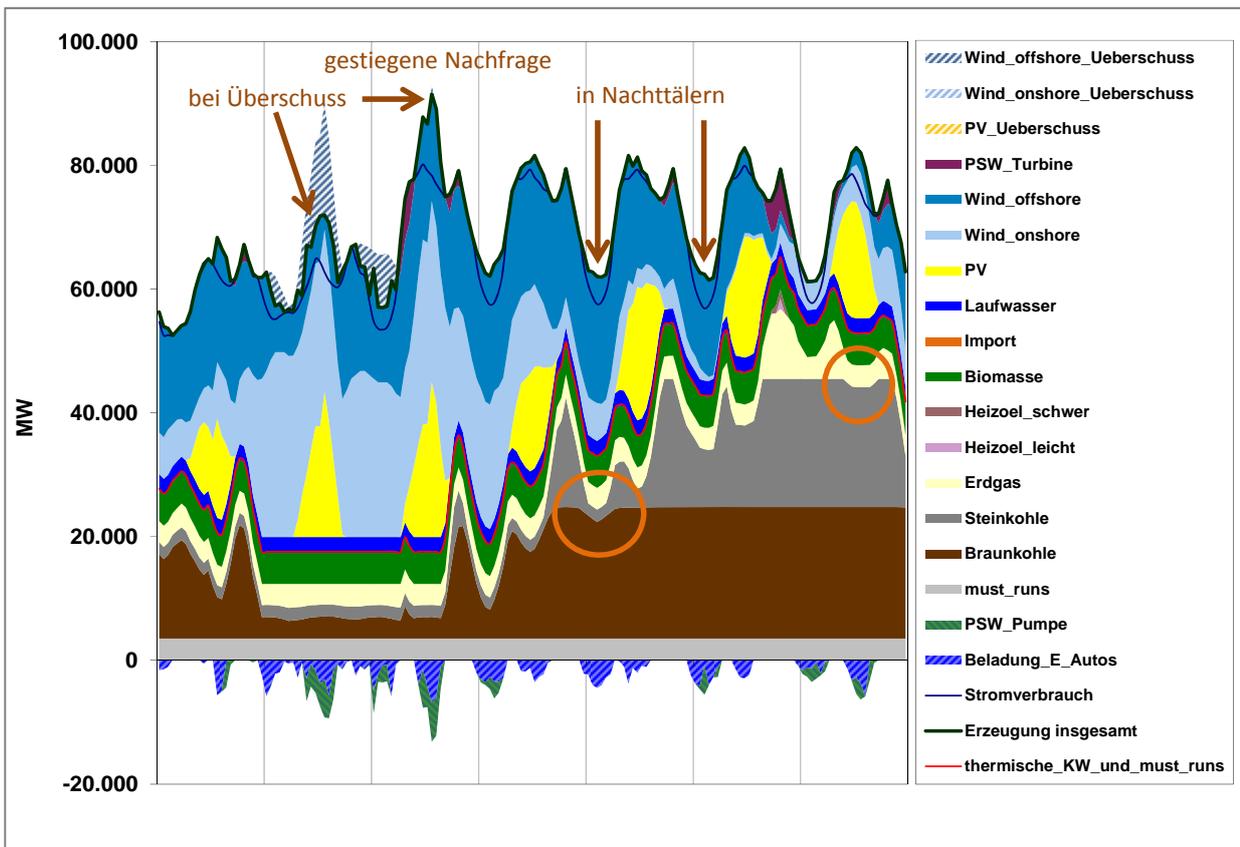


Abbildung 25: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), mit Lademanagement („mit LM 2“)

Wird dem Modell zusätzliche Windeinspeisung zur Verfügung gestellt, wie in Abbildung 26 dargestellt, kann zum einen die Stromproduktion aus konventionellen Kraftwerken in einigen Stunden verringert werden, zum anderen erhöhen sich aber auch die nicht nutzbaren erneuerbaren Überschüsse, wie beispielhaft in den orange markierten Bereichen sichtbar wird.

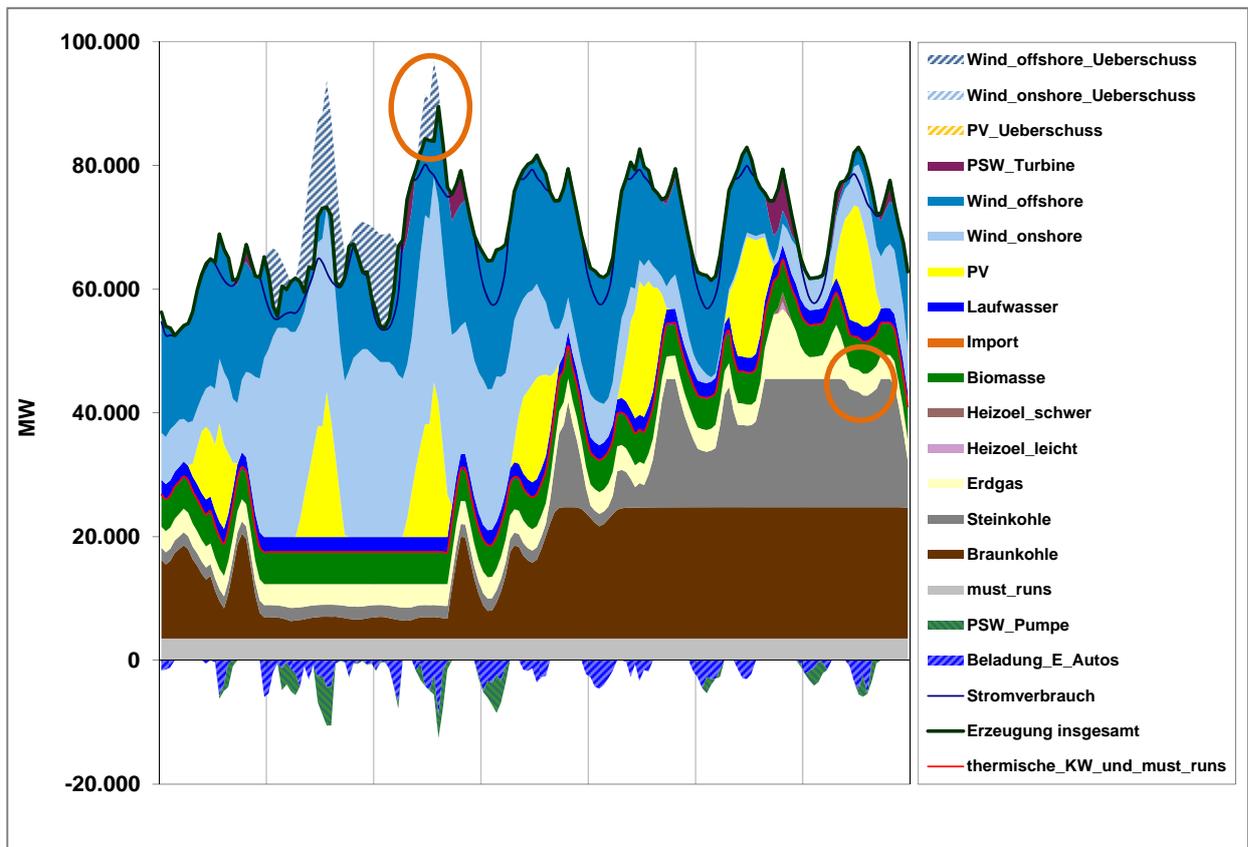


Abbildung 26: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität und zusätzlicher onshore Windeinspeisung, Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber), mit Lademanagement („mit LM 2 Wind“)

Für eine quantitative Auswertung der Modellierungsergebnisse werden im Folgenden für alle Modellläufe die jährlichen Werte einzelner Ergebnisgrößen in ihrer Veränderung gegenüber dem Basislauf ohne Elektromobilität analysiert.

### 6.5.2 Brennstoffmix und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung für Elektromobilität

Abbildung 27 und Abbildung 29 zeigen den Brennstoffmix des gegenüber dem Basislauf zusätzlich erzeugten Stroms in allen Modellläufen mit Elektromobilität für die Szenariojahre 2020 und 2030. In Abbildung 28 und Abbildung 30 sind für dieselben Modellläufe die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des zusätzlich erzeugten Stroms, der gesamten Stromerzeugung zum Vergleich sowie der Anteil der erneuerbaren Energien an der zusätzlichen Stromerzeugung dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten finden sich in Anhang C in Tabelle (Anhang) 7 bis Tabelle (Anhang) 14.

#### Szenario „mit Elektromobilität“ – Darstellung der Ergebnisse

Zunächst sollen die Läufe ohne zusätzliche erneuerbare Energien („ohne LM 1“, mit LM 1“, „ohne LM 2“, „mit LM 2“) genauer ausgewertet werden: Im Jahr 2020 besteht die zusätzliche Stromerzeugung vor allem aus zusätzlichem Kohlestrom (s. Abbildung 27 links), im Jahr 2030 dominieren Kohle und Erdgas die zusätzliche Stromerzeugung (s. Abbildung 29 links).

Grundsätzlich wird für das Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber) etwas mehr Strom bereitgestellt, als für das Ladeszenario 1 (Laden nach letzter Fahrt), da die Plug-In-Hybridfahrzeuge durch die häufiger zu Verfügung stehende Ladeinfrastruktur in Szenario 2 einen höheren elektrischen Fahranteil und damit einen höheren Stromverbrauch erreichen. Für die Zusammensetzung des zusätzlich produzierten Stroms treten jedoch zwischen den beiden Ladeszenarien keine strukturellen Unterschiede auf.

Deutlich sichtbar ist hingegen der Einfluss des Lademanagements. Zunächst fällt auf, dass die zusätzliche Stromerzeugung mit Lademanagement etwas geringer ausfällt als ohne Lademanagement. Dies erklärt sich aus dem unterschiedlichen Einsatz der Pumpspeicherkraftwerke: In den Modellläufen mit Lademanagement kommt weniger Turbinenstrom zum Einsatz als im Basislauf, während in den Läufen ohne Lademanagement mehr Turbinenstrom als im Basislauf benötigt wird. Wenn die Pumpspeicher weniger zum Einsatz kommen, sinken auch die in den Pumpspeicherkraftwerken auftretenden Energieverluste, die zuvor von den anderen Kraftwerken produziert werden müssen. Dadurch ist in den Läufen mit Lademanagement insgesamt weniger zusätzliche Stromerzeugung notwendig.

Auch auf die Zusammensetzung des zusätzlich produzierten Stroms wirkt sich das Lademanagement aus: Da das Laden in möglichst kostengünstige Stunden verschoben wird, steigt in beiden Jahren und für beide Ladeszenarien der Anteil der Braunkohle durch das Lademanagement an, während sich der Anteil von Steinkohle und Erdgas verringert. Im Jahr 2020, in dem noch Kernenergie in der Stromerzeugung vorhanden ist, führt das Lademanagement auch zu einem erhöhten Anteil von Kernenergie in der zusätzlichen Stromerzeugung. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der zusätzlichen Stromerzeugung bleibt dagegen im Jahr 2020 auch mit Lademanagement auf einem niedrigen Niveau von maximal 3%. Im Jahr 2030 steigt der Anteil der erneuerbaren Energien durch das Lademanagement von vorher 4% bzw. 5% auf 19%. Der Einsatz teurer Reservekraftwerke oder teurer Importe wird durch das Lademanagement reduziert.

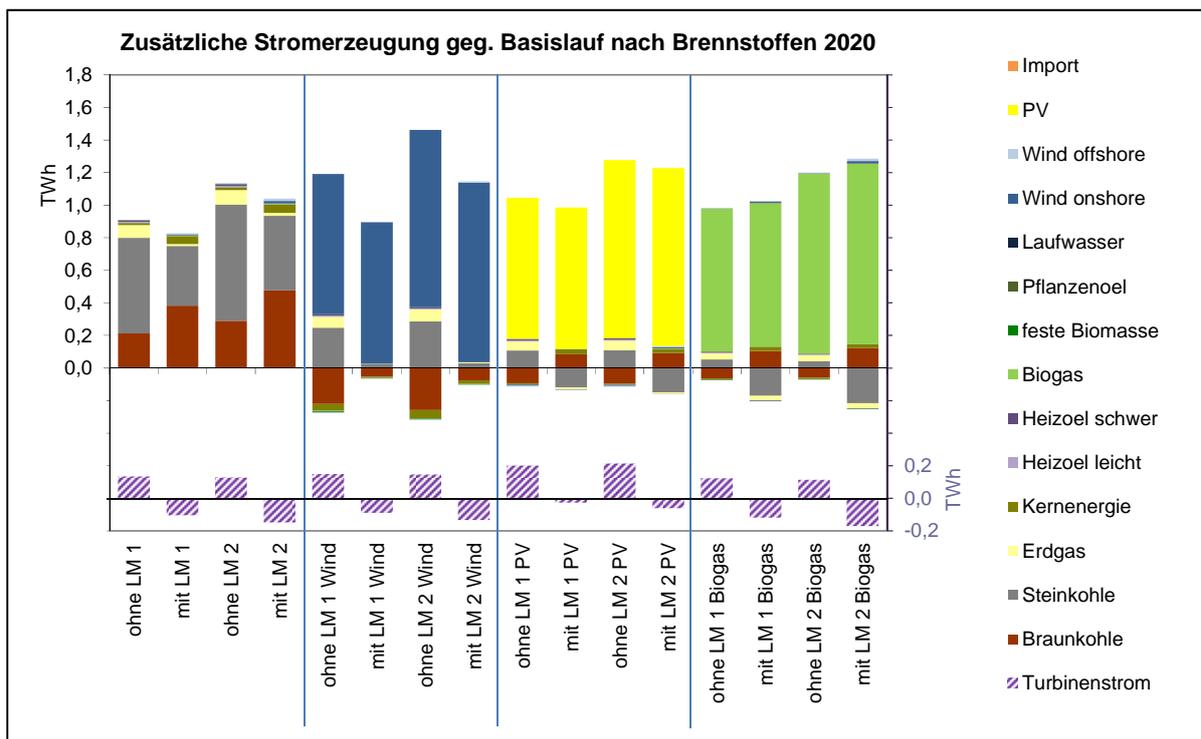


Abbildung 27: Graphische Darstellung des Brennstoffmixes der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2020

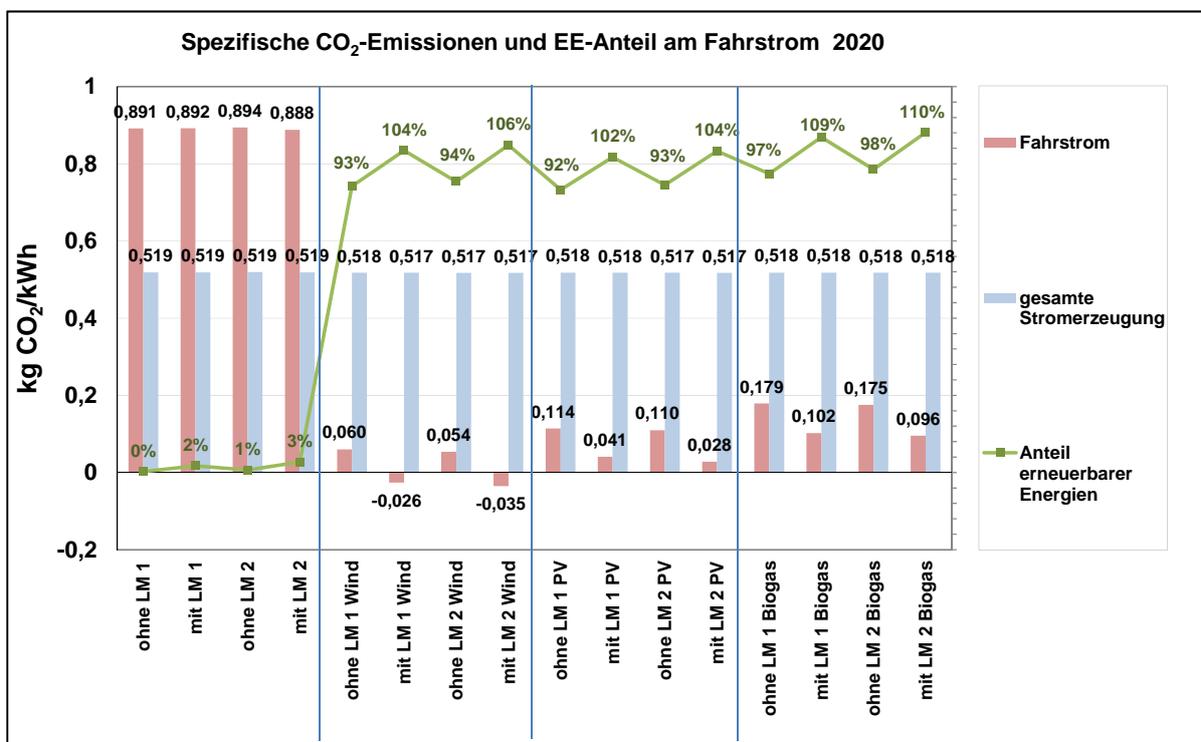


Abbildung 28: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung („Fahrstrom“) und der gesamten Stromerzeugung sowie Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom 2020

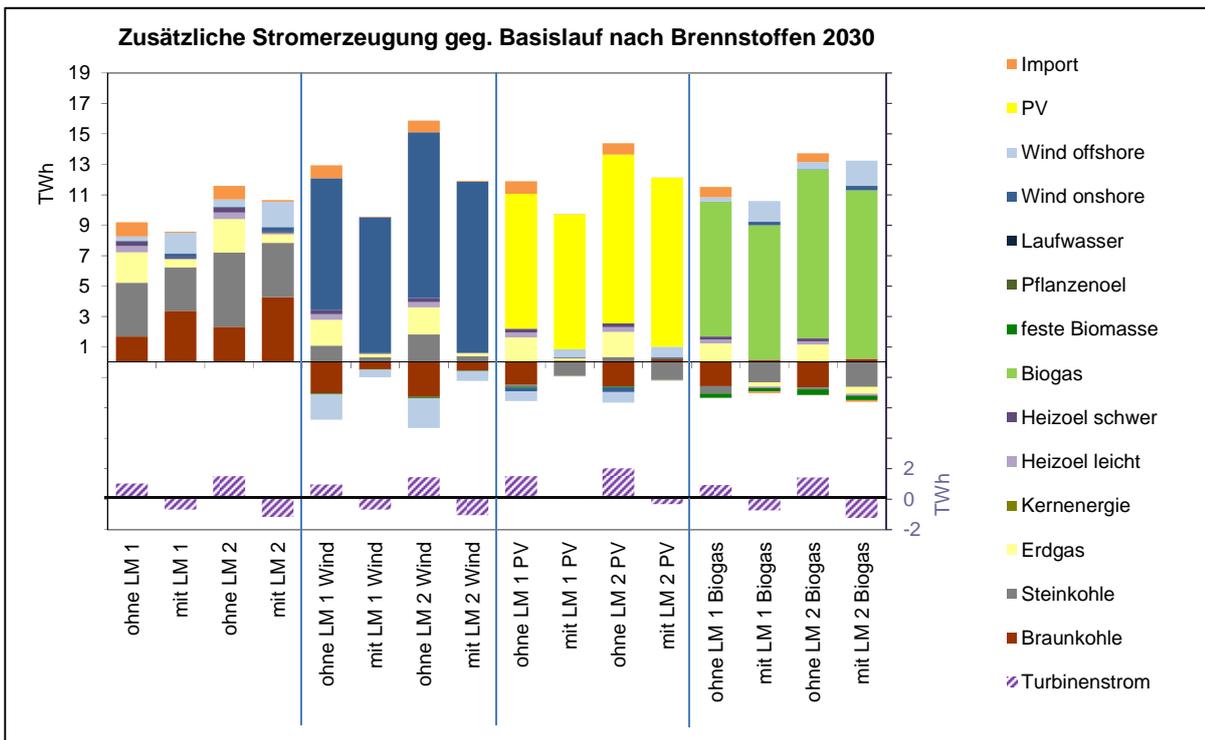


Abbildung 29: Graphische Darstellung des Brennstoffmixes der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2030

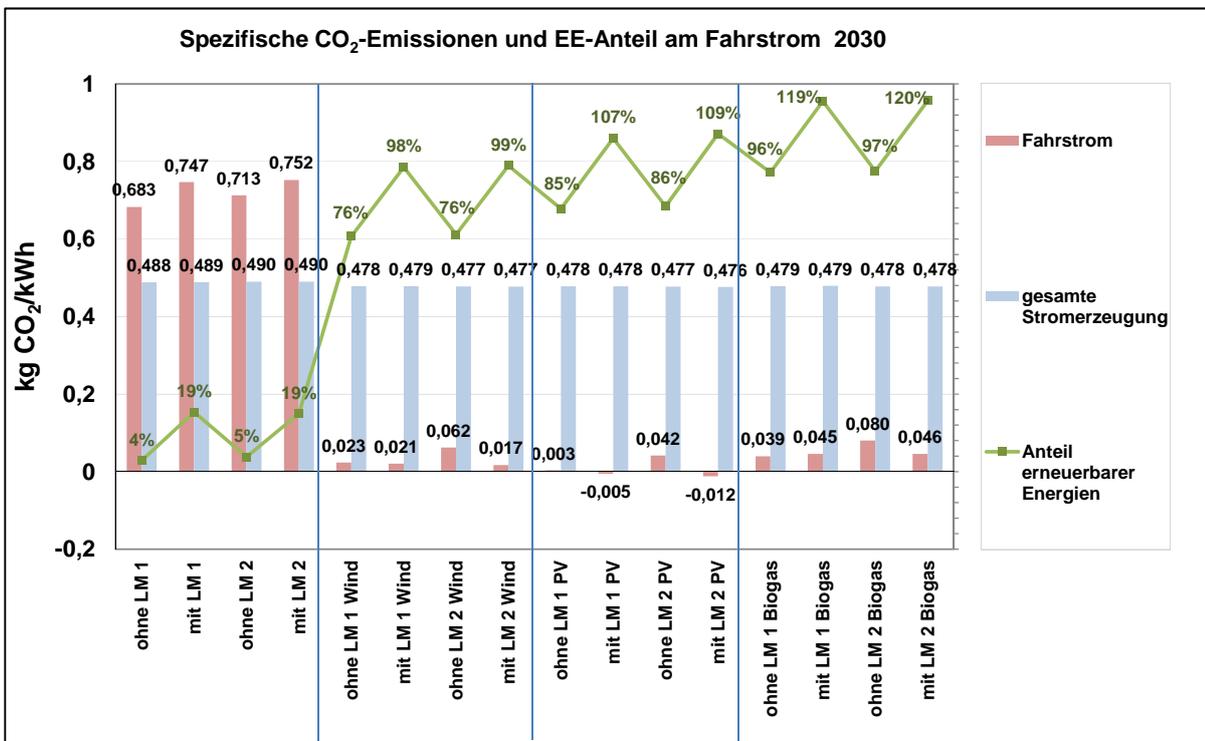


Abbildung 30: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der zusätzlichen Stromerzeugung („Fahrstrom“) und der gesamten Stromerzeugung sowie Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom 2030

### **Szenario „mit Elektromobilität“ – Diskussion der Ergebnisse**

Das Lademanagement sorgt für die möglichst kostengünstige Produktion des zusätzlich erzeugten Stroms. Daher verschiebt es die Ladung der Autos in solche Stunden, in denen das Grenzkraftwerk ein möglichst kostengünstiges ist. Das sind insbesondere Braunkohlekraftwerke, deren Anteil an der zusätzlichen Stromproduktion mit Lademanagement deutlich höher ist als ohne Lademanagement. Noch günstiger sind erneuerbare Energien und Kernenergie (nur im Jahr 2020 verfügbar), aber diese werden bereits im Basislauf ohne Elektromobilität stets bevorzugt zur Deckung der Stromnachfrage verwendet, so dass es nur in Ausnahmefällen noch freie erneuerbare oder nukleare Kapazitäten gibt.

Bei den fluktuierenden erneuerbaren Energien gibt es dann noch freie Kapazitäten, wenn bei hoher Einspeisung und niedriger Nachfrage das Dargebot den Bedarf übersteigt. Diese im Basislauf „überschüssigen“ erneuerbaren Energien können dann im Rahmen der für die Elektrofahrzeuge geltenden Restriktionen mit Hilfe des Lademanagements genutzt werden (siehe Abschnitt 6.5.3). Im Jahr 2030, wenn diese „Überschuss-Situationen“ häufiger auftreten als 2020, erhöht sich damit der Anteil der erneuerbaren Energien des Fahrstroms von ca. 5% im ungesteuerten Fall auf 19% mit Lademanagement.

Insgesamt erhöht das Lademanagement also sowohl den Anteil erneuerbarer Energien, falls es nutzbare Überschüsse gibt, als auch den Anteil an tendenziell emissionsintensiven Grundlastkraftwerken. Der zusätzlich produzierte Strom verursacht daher mit und ohne Lademanagement etwa gleich hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Jahr 2020 bewegen sich diese je nach Ladeszenario zwischen 0,7 Mt (Ladeszenario 1) und 1 Mt (Ladeszenario 2), im Jahr 2030 steigen sie auf 6,3 Mt (Ladeszenario 1) bis 8,2 Mt (Ladeszenario 2) (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Da die zusätzliche Stromproduktion durch den geringeren Einsatz der Pumpspeicherkraftwerke in den Läufen mit Lademanagement geringer ist, ergibt sich im Jahr 2030 mit Lademanagement bei etwa gleich hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen ein etwas höherer Emissionsfaktor (Abbildung 28 und Abbildung 30 links).

Ordnet man die zusätzliche Stromproduktion ursächlich der Elektromobilität zu, die als einziger Faktor zusätzlich ins System gekommen ist, so kann man diese Stromproduktion auch als „Fahrstrom“ interpretieren. Sein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor liegt in den bisher betrachteten Modellläufen mit knapp 900 g/kWh im Jahr 2020 bzw. ca. 700 g/kWh im Jahr 2030 deutlich über dem durchschnittlichen Emissionsfaktor der gesamten Stromproduktion mit 520 g/kWh (2020) bzw. 490 g/kWh im Jahr 2030 (siehe Abbildung 28 und Abbildung 30). Durch den zusätzlichen Verbrauch der Elektrofahrzeuge wird also nicht einfach mehr Strom mit durchschnittlicher Emissionsintensität produziert, sondern besonders CO<sub>2</sub>-intensiver Strom.

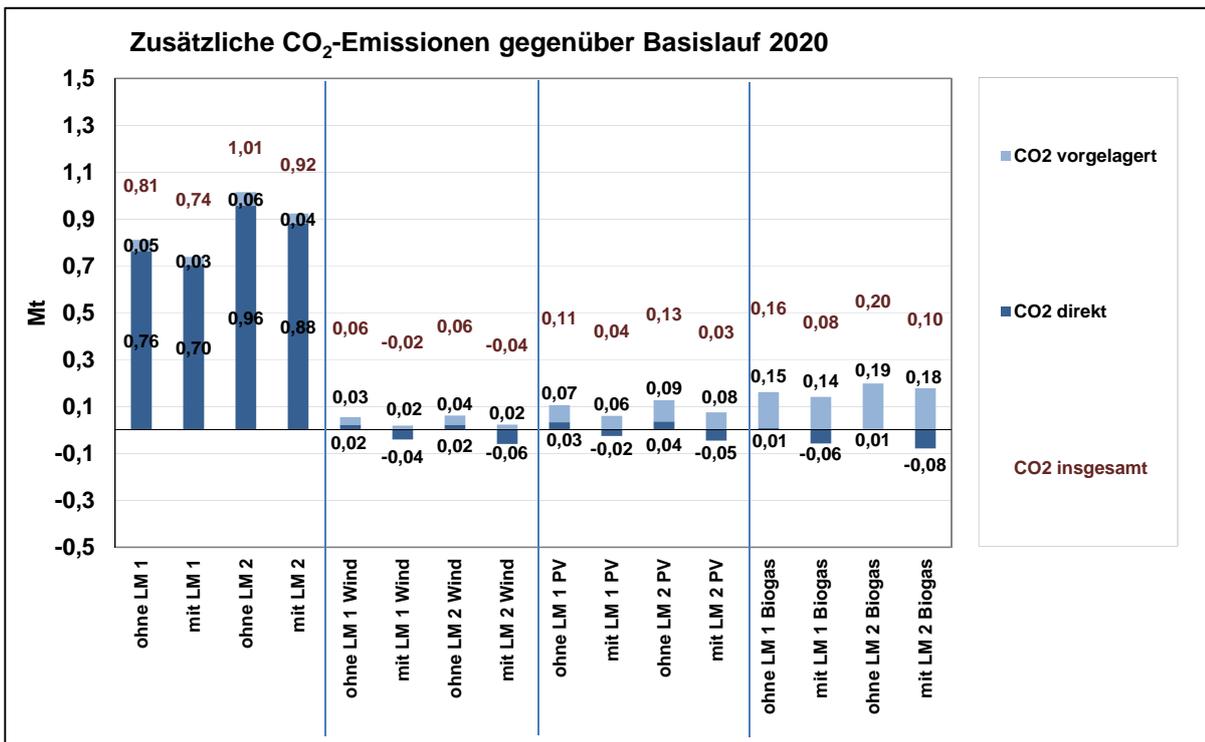


Abbildung 31: Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf nach vorgelagerten und direkten Emissionen für 2020

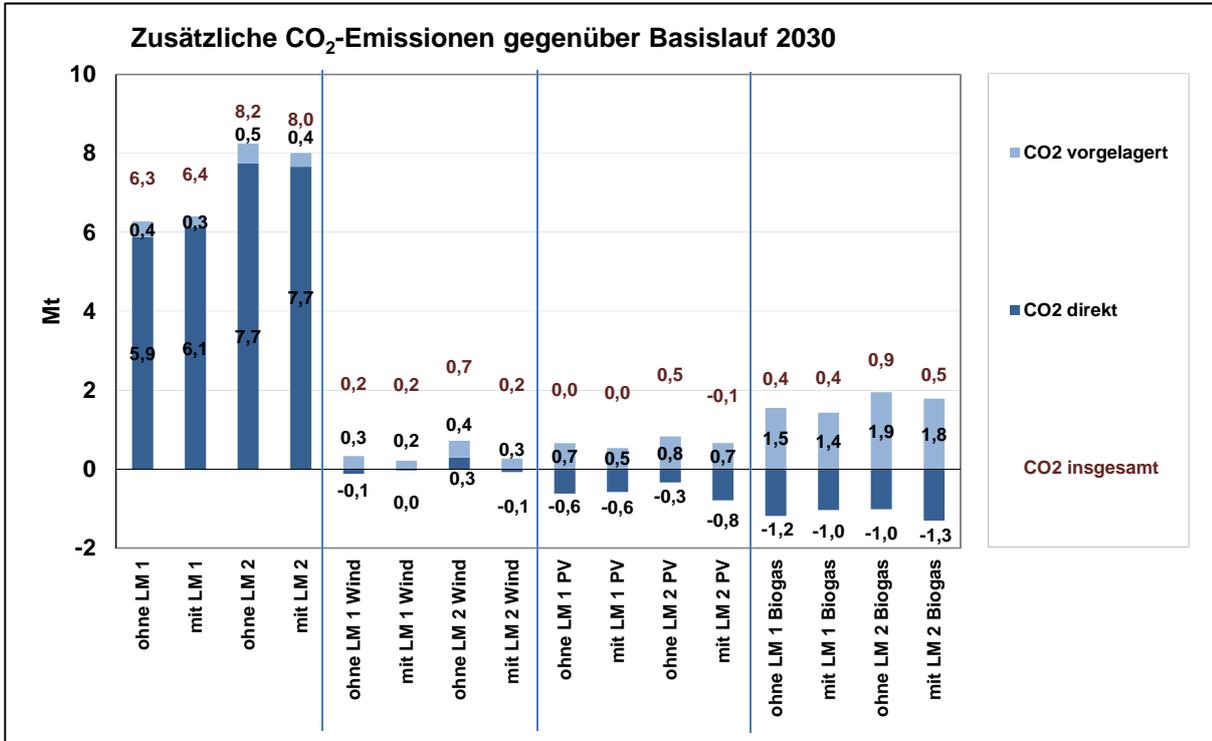


Abbildung 32: Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf nach vorgelagerten und direkten Emissionen für 2030

## Szenarien „Elektromobilität und zusätzliche erneuerbare Energien“ - Darstellung der Ergebnisse

In weiteren Modellläufen wurden dem Strommarktmodell neben der Elektromobilität auch zusätzliche erneuerbare Energien zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 6.4.1). In der Differenzbildung gegenüber dem Basislauf stellen diese zusätzlichen erneuerbaren Energien jeweils den größten Beitrag an der Stromerzeugung (s. Abbildung 27 und Abbildung 29). Aber auch auf den Einsatz der anderen Energieträger hat die Kombination aus zusätzlicher Elektromobilität und zusätzlichem erneuerbarem Strom Einfluss.

In den Läufen mit **zusätzlicher Stromerzeugung aus onshore Windkraftanlagen** verdrängt diese im Fall ohne Lademanagement im Jahr 2020 hauptsächlich Strom aus Braunkohle- und zum Teil aus Kernkraftwerken (Abbildung 27, negative Balken). Im Jahr 2030 geht die zusätzliche Windeinspeisung ohne Lademanagement ebenfalls zu Lasten von Braunkohle, zum Teil wird aber auch offshore Windeinspeisung verdrängt (Abbildung 29, negative Balken). Dabei ist zu beachten, dass hier die Modellmechanik bestimmt, welche fluktuierende erneuerbare Stromeinspeisung das Modell als „überschüssig“ interpretiert (siehe Abschnitt 6.5.1): Dass in der Darstellung der Ergebnisse offshore Wind verdrängt wird, lässt sich daher so interpretieren, dass das Hinzufügen von onshore Windeinspeisung dazu führt, dass in mehr Stunden als im Fall ohne zusätzliche erneuerbare Energien *die Summe aller fluktuierenden erneuerbaren Energien* den Bedarf übersteigt.

Während in manchen Stunden die zusätzliche Windstromproduktion Strom aus bestimmten Energieträgern verdrängt, erfordert der Verbrauch der Elektrofahrzeuge in anderen Stunden zusätzliche Produktion konventioneller Kraftwerke gegenüber dem Basiszenario. Auch für die Produktion der zusätzlichen Pumpspeicherverluste in beiden Jahren ist zusätzliche Stromproduktion aus Steinkohle und Erdgas notwendig (Abbildung 29). Im Jahr 2030 steigen auch die Stromerzeugung aus Öl und die Importe gegenüber dem Basislauf.

In den Läufen mit Lademanagement ist der wesentliche Unterschied zum Basislauf die zusätzliche Stromerzeugung aus den neuen onshore-Windkraftanlagen. Die Differenzen der fossilen Brennstoffe gegenüber dem Basislauf sind relativ niedrig. Sie zeigen weiterhin die gleiche Struktur wie in den Läufen ohne Lademanagement: weniger Braunkohle und Wind offshore sowie einen minimalen Anstieg von Steinkohle und Erdgas gegenüber dem Basislauf.

Wird **zusätzlicher Strom aus Photovoltaik (PV)** eingespeist, so sind die Effekte auf die konventionelle Stromerzeugung ohne Lademanagement strukturell mit denen bei zusätzlicher Windeinspeisung vergleichbar (Abbildung 27 und Abbildung 29): Gegenüber dem Basislauf wird weniger Braunkohle und mehr Steinkohle und Erdgas eingesetzt, im Jahre 2030 wird ebenfalls Wind (offshore) verdrängt, und Importe und Reservekraftwerke werden stärker genutzt.

Das Lademanagement führt in den Läufen mit zusätzlichem PV-Strom ebenfalls zu kleineren Differenzen der konventionellen Stromerzeugung gegenüber dem Basislauf. Anders als bei den Modellläufen mit zusätzlicher Windeinspeisung kann nun jedoch im Jahr 2030 auch etwas mehr Windenergie integriert werden als im Basislauf, im Jahr 2020 steigt dafür der Einsatz von Braunkohle, während Strom aus Steinkohle in beiden Jahren minimal zurückgeht.

Für die Pumpspeicherkraftwerke führen Elektromobilität ohne Lademanagement und zusätzliche PV-Anlagen zu einem vergleichsweise hohen zusätzlichen Einsatz, während das Lademanagement den Strom aus Pumpspeicherkraftwerken gegenüber dem Basislauf nur minimal reduzieren kann.

Werden dem Strommarktmodell **zusätzliche Biogas-Anlagen** als Input zur Verfügung gestellt, über deren Einsatz es unabhängig von Einspeiseprofilen frei entscheiden kann, so ergeben sich im ungesteuerten Fall im Jahr 2020 nur relativ geringe Änderungen bei der konventionellen Stromerzeugung gegenüber dem Basislauf. Ähnlich wie Wind und PV verdrängt auch die Biomasse in Läufen ohne Lademanagement in beiden Jahren Strom aus Braunkohle. Im Jahr 2020 stammt zusätzliche konventionelle Stromerzeugung aus Steinkohle und Erdgas, im Jahr 2030 nur aus Erdgas.

Ähnlich wie bei der Photovoltaik führt auch hier ein Lademanagement zu weniger Steinkohlestrom. Im Jahr 2020 wird dafür mehr Strom aus Braunkohle eingesetzt, im Jahr 2030 kann stattdessen, analog zu den PV-Läufen, wieder zusätzlicher Windstrom integriert werden.

### **Szenarien „Elektromobilität und zusätzliche erneuerbare Energien“ - Diskussion der Ergebnisse**

Die dargestellten Ergebnisse für die Läufe ohne Lademanagement mit zusätzlichen erneuerbaren Energien zeigen, dass die hier betrachteten erneuerbaren Energien, Wind, Photovoltaik und Biomasse vor allem Stromerzeugung in klassischen Grundlastkraftwerken verdrängen. Dies ist aus der Literatur bekannt [21]. Am stärksten tritt dieser Verdrängungsmechanismus bei der hier zugrunde gelegten Windeinspeisung auf (Abbildung 27 und Abbildung 29). Hier kann selbst das Lademanagement, das prinzipiell kostengünstigere (Grundlast-)Kraftwerke bevorzugt, diesen Effekt nicht komplett aufheben.

Bei zusätzlicher Photovoltaik-Einspeisung oder den regelbaren Biogasanlagen hingegen bewirkt das Lademanagement, dass die für die Elektrofahrzeuge stattfindende Stromerzeugung von teurerem Steinkohle- und Erdgasstrom hin zu kostengünstigeren Alternativen wie Braunkohle (2020) bzw. Wind (2030) verlagert wird.

Niedrige Differenzen zum Basislauf bei der konventionellen Stromerzeugung, wie sie vor allem bei den Läufen mit zusätzlicher Windeinspeisung und Lademanagement in beiden Jahren auftreten, legen den Schluss nahe, dass sich die beiden gegenüber dem Basislauf zusätzlichen Faktoren, die Elektromobilität auf der Verbrauchsseite und die Windenergieeinspeisung auf der Erzeugungsseite, in diesem Fall genau gegenseitig aufheben. Daraus könnte man schließen, dass der Einsatz konventioneller Kraftwerke von der zusätzlichen Windeinspeisung und der zusätzlichen Elektromobilität weitgehend unberührt bliebe. Dies ist jedoch auf der zeitlich höher aufgelösten Skala nicht notwendigerweise der Fall. Da es sich bei den gezeigten Daten für den Brennstoffmix um jährliche Bilanzen für jeden Brennstoff handelt, kann es durchaus sein, dass beispielsweise die Elektromobilität in einer Stunde zu vermehrter Steinkohle-Stromproduktion führt und die zusätzliche Windenergie in einer anderen Stunde Steinkohle-Produktion verdrängt, so dass in Summe über das ganze Jahr etwa gleichviel Strom aus Steinkohle produziert wird, wie im Basislauf. Niedrige Differenzen zum Basislauf in der Jahresbilanz bei der Stromproduktion konventioneller Kraftwerke, können also auch bedeuten, dass Windenergie und Elektromobilität jeweils ähnliche Grenzkraftwerke verdrängen bzw. aktivieren.

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Differenzstromerzeugung variiert in den betrachteten Modellläufen von 76 % bis 120 % (s. Abbildung 28 und Abbildung 30). Im ungesteuerten Fall verdrängt im Jahr 2030 zusätzliche Windeinspeisung bisherige Windeinspeisung, so dass der erneuerbare Anteil insgesamt hier nur 76 % beträgt. Durch das Lademanagement kann

überschüssiger erneuerbarer Strom generell besser integriert werden, so dass der erneuerbare Anteil auf nahezu 100 % steigt.

In allen Varianten mit zusätzlichen erneuerbaren Energien und Lademanagement kann der Fahrstrom damit als vollständig erneuerbar angesehen werden. In den Varianten mit zusätzlichen PV- und Biogas-Anlagen steht nicht nur deren zusätzliche Stromerzeugung zur Verfügung, sondern das Lademanagement kann außerdem bisher nicht integrierbaren überschüssigen erneuerbaren Strom nutzen, so dass sich rechnerisch ein erneuerbarer Anteil an der Differenzstromerzeugung von über 100% ergibt. Es wird also nicht nur der Bedarf der Fahrzeuge gedeckt, sondern darüber hinaus auch konventioneller Strom verdrängt.

Die Emissionsfaktoren des zusätzlich erzeugten Stroms liegen zwischen maximal 179 g/kWh und niedrigen negativen Werten, wenn durch Verdrängungseffekte weniger CO<sub>2</sub> emittiert wurde als im Basislauf. Für die erneuerbare Stromerzeugung sind dabei die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den vorgelagerten Prozessketten relevant, wie auch aus Abbildung 31 und Abbildung 32 ersichtlich wird, in denen die Differenzen der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Basislauf dargestellt sind.

### 6.5.3 Beitrag der Elektromobilität zur Integration der erneuerbaren Energien

Eine Möglichkeit, Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom zu laden, besteht darin, erneuerbaren Strom zu nutzen, der bisher „überschüssig“ war. So heißt es im Regierungsprogramm Elektromobilität [22] vom Mai 2011:

*„Der zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie in diesem Sektor ist durch Strom aus Erneuerbaren Energien zu decken. Vorrangig sollte dafür der anderweitig nicht nutzbare Strom aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien im Rahmen des Lastmanagements durch Elektromobilität genutzt werden. Für den darüber hinaus gehenden Strombedarf für Elektromobilität sind weitere Ausbaupotentiale der Erneuerbaren Energien zu erschließen.“*

Neben dem Nutzen für die Fahrzeuge wäre mit der Ladung von „Überschuss“-Strom auch ein Beitrag für die Integration der erneuerbaren Energien verbunden, der im Folgenden diskutiert wird.

Abbildung 33 zeigt die überschüssige Stromproduktion der fluktuierenden erneuerbaren Energien in verschiedenen Modellläufen für 2030. „Überschüssig“ in der hier dargestellten Modellierung bedeutet dabei, dass diese Stromproduktion nicht zum gleichen Zeitpunkt von inländischen Verbrauchern oder Speichern genutzt werden kann. Davon unbenommen, aber im Modell nicht vorgesehen, ist ein möglicher Export dieser Strommengen. In der Realität wäre auch die Nutzung durch hier nicht abgebildete zusätzliche Speicher oder andere flexible Verbraucher denkbar. Ebenfalls in der Modellierung nicht berücksichtigt ist erneuerbare Energie, die aufgrund von Netzengpässen nicht eingespeist werden kann.

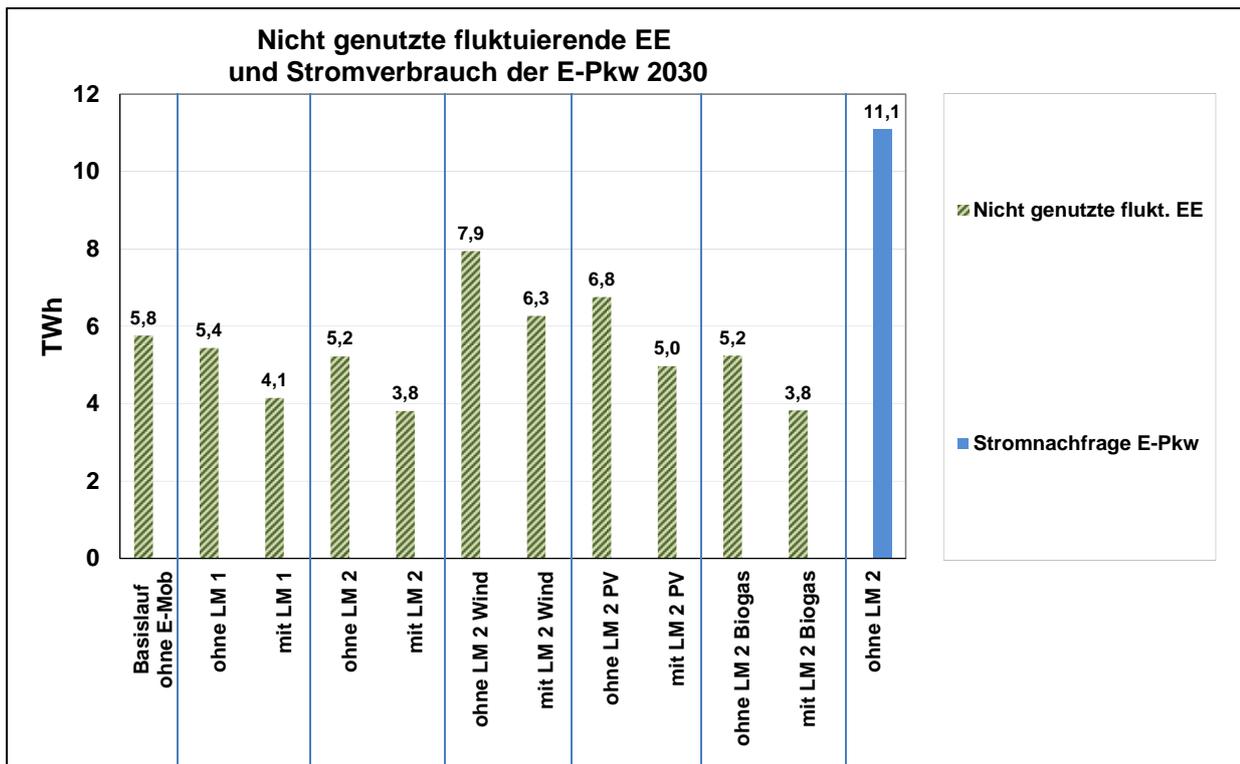


Abbildung 33: Nicht genutzte fluktuierende erneuerbare Energien in verschiedenen Modellläufen für 2030 im Vergleich zum Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge

Im Basisszenario ohne Elektromobilität sind im Jahr 2030 knapp 6 TWh aus fluktuierenden erneuerbaren Energien in diesem Sinne überschüssig. Die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 liegt im Fall von Ladeszenario 2 (Laden auch tagsüber) bei gut 11 TWh. Rechnerisch könnte also ungefähr die Hälfte des Bedarfs der Elektromobilität durch bisher überschüssige erneuerbare Energie gedeckt werden. Aufgrund der Restriktionen, die für die Fahrzeuge gelten, die für die vorgegebenen Fahrten mit ausreichend voller Batterie zur Verfügung stehen müssen, und deren Speicherkapazität begrenzt ist, lässt sich dieses Potential jedoch nur zum Teil nutzen. Das Lademanagement schöpft dieses Potential im Rahmen der genannten Restriktionen soweit wie möglich aus, mit dem Ergebnis, dass die Überschüsse je nach Ladeszenario auf 4,1 bzw. 3,8 TWh sinken. Die nun genutzten 1,7 bzw. 2 TWh machen den größten Teil des oben dargestellten erneuerbaren Anteils am Fahrstrom in Höhe von 19 % in Abbildung 29 und Abbildung 30 aus.

Bezogen auf das Dargebot fluktuierender erneuerbarer Energie von insgesamt rund 250 TWh im Jahr 2030 (vgl. Abschnitt 6.4.1) beträgt die nicht nutzbare erneuerbare Energie hingegen im Basisszenario nur 2,3 %. Betrachtet man nur Wind und Photovoltaik, so sind 2,5 % des Dargebots überschüssig. Im Jahr 2020 treten nicht nutzbare erneuerbare Überschüsse in noch kleinerem Maße auf; im Basislauf sind es nur 0,1 % des insgesamt vorhandenen Dargebots.

Mit den für die Modellierung verwendeten Annahmen scheint also die Nicht-Integrierbarkeit fluktuierender erneuerbarer Energien erst ab erneuerbaren Anteilen am Stromsystem, wie sie hier für 2030 angenommen wurden, überhaupt eine nennenswerte Rolle zu spielen. Aus Sicht des Energiesystems ist deshalb auch der Beitrag, den die Elektromobilität in Kombination mit Lademanagement für die Integration erneuerbarer Energien bis dahin leisten kann, eher

gering. Um den Anteil der erneuerbaren Energien am Fahrstrom zu steigern, ist jedoch, wie dargestellt, ein preisoptimiertes Lademanagement durchaus zielführend.

Durch zusätzliche erneuerbare Energien wird zwar der Fahrstrom, wie dargestellt, „erneuerbarer“, gleichzeitig steigen jedoch im Fall von zusätzlichem Wind- und Solarstrom die nicht nutzbaren Überschüsse an. Ohne Lademanagement sind es in knapp 8 TWh bei zusätzlicher Windeinspeisung und knapp 7 TWh bei zusätzlichen PV-Anlagen. Mit Lademanagement sinken die Überschüsse auf gut 6 TWh (Wind) bzw. 5 TWh (PV). Nur in der Variante mit zusätzlichen, steuerbaren Biogas-Anlagen sinken die Überschüsse auf dieselben Werte wie im Fall ohne zusätzliche erneuerbare Energien bei gleichem Ladeszenario.

### **EXKURS: Netzengpässe und Abregelung von Windkraftanlagen**

Die dargestellten Zahlen stehen, wie oben erwähnt, unter dem Vorbehalt, dass Netzengpässe, die zu nicht nutzbarer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien führen, nicht abgebildet werden. Die vorliegende Modellierung entspricht damit einer Welt, in der die Netze so weitgehend ausgebaut wurden, dass Netzengpässe kein relevantes Problem für die nahezu vollständige Nutzung des fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Stroms darstellen. In wie weit diese Annahme für die Jahre 2020 und 2030 zutrifft, ist Thema anderer Forschungsarbeiten. Auch inwieweit es volkswirtschaftlich und gesellschaftlich sinnvoll ist, möglichst jede Kilowattstunde Wind- oder Solarstrom zu nutzen, wenn dafür ein immenser Netzausbau notwendig wäre, kann hier nicht beantwortet werden.

Historische Daten geben einen Anhaltspunkt dafür, dass zumindest heute Netzengpässe, die zur Abregelung insbesondere von Windkraftanlagen führen, hauptsächlich im Verteilnetz auftreten. So haben [23] die von Einspeisemanagement betroffenen Windenergieanlagen in verschiedenen Netzgebieten für 2009 untersucht und kommen zu dem Ergebnis, dass 0,2 % der insgesamt in Deutschland eingespeisten Windenergie nicht ins Netz eingespeist werden konnten. Allerdings variieren die Werte zwischen verschiedenen Netzbetreibern erheblich. Im Zeitraum von 2004 bis 2009 konstatieren die Autoren eine Steigerung der Ausfallarbeit auf das Siebenfache, weisen aber darauf hin, dass die Datenlage keine Aussage über die zukünftige Entwicklung erlaubt.

Inwieweit in der Zukunft durch einen befürchteten mangelnden Ausbau vor allem auf Übertragungsnetzebene Windenergie verloren geht, lässt sich aus der heutigen Situation, in der vor allem Verteilnetze den Engpass bilden, nicht ableiten. Qualitativ lässt sich feststellen, dass Elektromobilität durchaus dann einen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien in einer Netzengpasssituation leisten könnte, wenn durch ihren Einsatz der Stromtransport auf den kritischen Trassen reduziert werden kann. Dazu ist jedoch Voraussetzung, dass die räumliche Verteilung der Fahrzeuge eine solche Entlastung mit sich bringt, die Elektrofahrzeuge also dort stehen, wo auch der sonst nicht transportierbare, erneuerbare Strom anfällt und die Fahrzeuge dort genau dann laden, wenn der lokale Überschuss auftritt. Ist dies gegeben, so könnte der Beitrag der Elektrofahrzeuge zur Integration der erneuerbaren Energien über das in der Modellierung dargestellte Maß hinausgehen.

## CO<sub>2</sub>-Bilanz Elektromobilität

### 7.1 Hintergrund

Elektrofahrzeuge verursachen im elektrischen Fahrbetrieb keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese können jedoch in der vorgelagerten Kette bei der Stromerzeugung entstehen und sind somit dem Fahrzeug zuzuordnen. Bei herkömmlichen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen entstehen die Hauptemissionen hingegen bei der Verbrennung, während die vorgelagerten Emissionen der Kraftstoffbereitstellung im Regelfall von untergeordneter Bedeutung sind. Sie gewinnen mit zunehmender Biokraftstoffbeimischung jedoch in der Bilanzierung immer stärker an Bedeutung und müssen entsprechend berücksichtigt werden.

Angesichts dieses Sachverhalts ist ein aussagekräftiger Vergleich konventioneller und elektrisch betriebener Pkw auf Fahrzeug-, wie auch auf Bestandsebene, nur möglich, wenn sowohl die indirekten als auch die direkten Emissionen in die Bilanzierung einbezogen werden (Well-to-Wheel-Ansatz). Der Vergleich auf Einzelfahrzeugebene ermöglicht es, die Unterschiede der CO<sub>2</sub>-Emissionen für unterschiedliche Antriebstypen zu veranschaulichen. Die Betrachtung des Pkw-Gesamtbestands ermöglicht es, Rückschlüsse auf die CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Elektrofahrzeugen im Kontext des deutschen Pkw-Bestands zu ziehen und gegenüber einer Entwicklung ohne Elektrofahrzeuge einzuordnen. Angesichts der besonderen Bedeutung der Art der Strombereitstellung auf die CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Elektromobilität (siehe Kapitel 6) werden die Effekte verschiedener Stromerzeugungsoptionen im Rahmen von Alternativbetrachtungen gegenübergestellt.

Das in den folgenden Abschnitten dargestellte methodische Vorgehen und die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung für die betrachteten Szenarien beziehen sich auf die unmittelbaren Auswirkungen von Elektromobilität auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Einzelfahrzeugen bzw. des Pkw-Bestands. Mögliche Wechselwirkungen mit dem Europäischen Emissionshandelssystem (ETS) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Durch das „Cap“ des Emissionshandels sind bis zum Jahr 2020 zwar die Emissionen der ETS-Sektoren – inklusive der Stromerzeugung und unabhängig vom zusätzlichen Strombedarf von Elektromobilität – begrenzt. Jedoch wird die weitere Fortschreibung des Caps nach 2020 und eine mögliche Berücksichtigung der zusätzlichen Stromerzeugung für Elektromobilität nach diesem Zeitpunkt Gegenstand weiterer politischer Entscheidungen sein. Dazu ist zunächst die Quantifizierung der Effekte auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen notwendig, die sich mit der Elektromobilität durch die Verschiebung von Energienachfrage und Emissionen aus dem Verkehrssektor in den Stromsektor ergeben.

### 7.2 Vorgehen und Rahmenbedingungen

Grundsätzlich werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Pkw durch die Fahrleistung, den spezifischen Energieverbrauch, sowie die CO<sub>2</sub>-Intensität des eingesetzten Kraftstoffes bestimmt. Der Vergleich der Emissionssituation von konventionellen Pkw mit Plug-In-Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen sowie die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzials von Elektromobilität im deutschen Pkw-Bestand erfordert daher die Bestimmung dieser drei Einflussgrößen für den Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030.

Die Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Effekte von Elektromobilität setzt auf dem in Kapitel 4 vorgestellten Bestandsmodell auf. Dazu werden der dargestellte Fahrzeugbestand und die fahrzeugspezifische Jahresfahrleistung mit Informationen zum spezifischen Energieverbrauch des jeweiligen Fahrzeugtyps und der CO<sub>2</sub>-Intensität der eingesetzten Kraftstoffe im jeweiligen Betrachtungsjahr gekoppelt. Die Ergebnisse der Strommarktmodellierung bilden dabei die Grundlage für die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Intensität der Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung verschiedener Optionen der zusätzlichen Stromerzeugung.

Die wichtigsten Modellannahmen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### **Fahrleistung**

Die Entwicklung der fahrzeug- und größenklassenspezifischen Pkw-Fahrleistung ist im Bestandsmodell für den Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030 implementiert. Grundsätzlich zeichnen sich batterieelektrische Pkw durch geringere Jahresfahrleistungen als konventionelle Vergleichsfahrzeuge aus. Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge erreichen gemäß der Mobilitätsdatenauswertung deutlich höhere Jahresfahrleistungen. Eine Übersicht der fahrzeugspezifischen Jahresfahrleistung gibt Tabelle 6 in Abschnitt 4.3.

### **Spezifischer Energieverbrauch**

Fahrzeuge mit batterieelektrischem und Plug-In-Hybrid-Antrieb zeichnen sich im elektrischen Betrieb durch eine ausgesprochen hohe Energieeffizienz aus. Gemäß der Szenarioannahmen (siehe Abschnitt 2.2) ist in den kommenden zwei Dekaden mit einer weiteren Effizienzsteigerung um bis zu 10 % zu rechnen. Eine detaillierte Übersicht der Annahmen zu den fahrzeugspezifischen Energieverbräuchen findet sich in Anhang A.

Auch bei konventionellen verbrennungsmotorischen Pkw ist in den kommenden zwei Dekaden noch mit erheblichen Effizienzfortschritten zu rechnen. Im Bestandsmodell orientieren sich die Energieverbräuche von Pkw mit Otto- und Diesel-Motor in den Größenklassen klein, mittel und groß an den Referenzverbrauchswerten aus der Pkw-Technologiedatenbank Renewability für das Jahr 2005 [24] und werden bis zum Jahr 2010 gemäß der Entwicklung des Monitoringberichts der EU-Kommission [25] fortgeschrieben. Die zukünftige Effizienzentwicklung bei konventionellen Pkw orientiert sich am 2009 beschlossenen EU-Grenzwert für Pkw-Neuzulassungen, der einen Grenzwert für die gesamte Flotte von 130 g CO<sub>2</sub>/km bis 2015 und in seiner Fortschreibung bis zum Jahr 2020 einen Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km vorsieht. In Anlehnung an TREMOD, Version 5 [12], wird im Bestandsmodell für die Pkw-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2020 ein an die Segmentstruktur angepasster Durchschnittswert von 108 g CO<sub>2</sub>/km und 95 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2030 angenommen. Für die im Bestandsmodell berücksichtigten Fahrzeugklassen ergibt sich daraus die in Tabelle 16 dargestellte Entwicklung der Kraftstoffverbräuche nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ).

Tabelle 16: Kraftstoffverbrauch [l/100 km] der verbrennungsmotorischen Pkw-Neuzulassungen nach NEFZ

|             | Otto  |        |      | Diesel |        |      |
|-------------|-------|--------|------|--------|--------|------|
|             | klein | mittel | groß | klein  | mittel | groß |
| <b>2010</b> | 5,2   | 6,4    | 8,6  | 3,6    | 4,8    | 6,4  |
| <b>2020</b> | 3,8   | 4,7    | 6,2  | 2,6    | 3,5    | 4,6  |
| <b>2030</b> | 3,3   | 4,1    | 5,5  | 2,3    | 3,0    | 4,1  |

Gegenüber dem Ausgangsjahr 2010 verringern sich damit der Energieverbrauch – und somit auch die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen – von verbrennungsmotorischen Pkw bis zum Jahr 2020 um weitere 28 % und bis zum Jahr 2030 um 36 %.

Die dargestellten Verbrauchswerte für elektrische, wie auch verbrennungsmotorische Pkw stellen jedoch nicht reale Energieverbrauchswerte, sondern unter normierten Messbedingungen erzielte Werte dar. Da die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung sich jedoch auf reale Emissionen des Pkw-Bestands bezieht und diese im Regelfall deutlich über den Normwerten liegen, wird für die Emissionsberechnung ein Realverbrauchsaufschlag von 10 % für alle betrachteten Antriebstypen vorgenommen. Für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb wird ferner für die Batterieladung ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 90 % angenommen, welcher den Energieverbrauch weiter erhöht.

### CO<sub>2</sub>-Intensität der Kraftstoffe

Die Kombination aus Fahrleistung und fahrzeugspezifischem Energieverbrauch ermöglicht es, den Energiebedarf des Pkw-Bestands differenziert nach Kraftstoffen zu bestimmen. Um Aussagen zu den assoziierten CO<sub>2</sub>-Emissionen treffen zu können, müssen Informationen zur CO<sub>2</sub>-Intensität des jeweiligen Kraftstoffes berücksichtigt werden. Beim hier gewählten Ansatz werden – aus den oben genannten Gründen – neben den direkten Emissionen, die im Fahrzeugbetrieb entstehen, auch die Vorkettenemissionen einbezogen. Bei konventionellen Kraftstoffen umfassen diese die Förderung, Aufbereitung und den Transport. Für die Stromerzeugung werden die Emissionen der Brennstoffbereitstellung, der Stromerzeugung, aber auch der Anlagenbau und -entsorgung bilanziell berücksichtigt.

Für die Stromerzeugung wurde bereits in Kapitel 6 die starke Variabilität der Vorkettenemissionen in Abhängigkeit vom jeweiligen Betrachtungsjahr und insbesondere in Bezug auf die jeweilige Art der Stromerzeugung ausführlich dargelegt. Jedoch gilt auch für konventionelle Kraftstoffe kein statischer CO<sub>2</sub>-Wert, da insbesondere unter der Annahme einer verstärkten Biokraftstoffbeimischung die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftstoffvorkette bis zum Jahr 2030 voraussichtlich deutliche Veränderungen erfahren werden. Grundlagen dieser Annahme sind mehrere gesetzliche Regelungen zur zukünftigen Nutzung von Biokraftstoffen. So legt das modifizierte Biokraftstoffquotengesetz einen Mindestwert für den Kraftstoffanteil von Biodiesel und Ethanol für die kommenden Jahre fest. Ferner werden durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der Europäischen Kommission und die Dekarbonisierungsstrategie der Bundesregierung Vorgaben zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Intensität von Biokraftstoffen im Vergleich zu herkömmlichen Flüssigkraftstoffen bis zum Jahr 2020 gemacht.

Für die Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Otto- und Dieselmotoren werden diese Entwicklungen im Modell in Anlehnung an TREMOD [12] folgendermaßen berücksichtigt:

- » Der Anteil von Ethanol am Ottokraftstoff steigt von 4 % (2010) auf 10 % (2020 bzw. 2030).
- » Der Biodieselanteil am Dieselmotorkraftstoff steigt von 7 % (2010) auf 13 % (2020 bzw. 2030).

Ethanol und Biodiesel besitzen dabei gegenüber konventionellem Otto- und Dieselmotorkraftstoff eine um 52 % (2010) bzw. 60 % (2020 bzw. 2030) geringere CO<sub>2</sub>-Intensität.

Tabelle 17 veranschaulicht die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Intensität von Otto- und Dieselmotorkraftstoff im Betrachtungszeitraum unter Berücksichtigung des zunehmenden Anteils an Biokraftstoffen und deren abnehmender CO<sub>2</sub>-Intensität. Die aufgeführte Entwicklung bildet die Grundlage für die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Flüssigmotorkraftstoffen im Bestandsmodell.

Tabelle 17: CO<sub>2</sub>-Intensität von Otto- und Dieselmotorkraftstoff [g CO<sub>2</sub>/kWh] unter Berücksichtigung des ansteigenden Biokraftstoffanteils

| <b>Kraftstoff</b>                |                                | <b>2010</b>         | <b>2020</b>         | <b>2030</b>         |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Benzin                           | direkte Emissionen             | 259,2               | 259,2               | 259,2               |
|                                  | indirekte Emissionen           | 50,5                | 56,6                | 56,6                |
| Ethanol                          | direkte Emissionen             | 259,2               | 259,2               | 259,2               |
|                                  | indirekte Emissionen           | -110,5              | -132,9              | -132,9              |
|                                  | Anteil                         | 4,0%                | 10,0%               | 10,0%               |
| <b><i>Benzin / Ethanol</i></b>   | <b><i>Gesamtemissionen</i></b> | <b><i>303,3</i></b> | <b><i>296,9</i></b> | <b><i>296,9</i></b> |
| Diesel                           | direkte Emissionen             | 266,4               | 266,4               | 266,4               |
|                                  | indirekte Emissionen           | 35,4                | 39,7                | 39,7                |
| Biodiesel                        | direkte Emissionen             | 254,9               | 254,9               | 254,9               |
|                                  | indirekte Emissionen           | -110,0              | -132,5              | -132,5              |
|                                  | Anteil                         | 7,0%                | 13,0%               | 13,0%               |
| <b><i>Diesel / Biodiesel</i></b> | <b><i>Gesamtemissionen</i></b> | <b><i>290,8</i></b> | <b><i>282,2</i></b> | <b><i>282,2</i></b> |

Die CO<sub>2</sub>-Intensität der durch Elektrofahrzeuge nachgefragten Strommenge ergibt sich aus der Strommarktmodellierung. Wie in Kapitel 6 ausführlich diskutiert, beziehen sich die ermittelten Emissionsfaktoren der, durch Elektromobilität generierten, Stromnachfrage jeweils auf die Treibhausgasintensität dieser zusätzlich erzeugten Strommenge. Damit werden alle Emissionen, die durch die zusätzliche Stromnachfrage entstehen, dem Einsatz von Elektrofahrzeugen zugesprochen.

Alternativ könnte eine CO<sub>2</sub>-Bilanz theoretisch auch mit dem durchschnittlichen Emissionsfaktor der Gesamtstromerzeugung berechnet werden. In diesem Fall würde die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge genauso wie andere Stromverbraucher behandelt werden, die Auswirkungen von Elektromobilität könnten dann jedoch nicht mehr isoliert werden. Zur Bewertung des möglichen Umweltnutzens wird daher die zuerst angesprochene Variante verwendet, um explizit die Auswirkungen des Einsatzes von Elektrofahrzeugen durch die **zusätzliche** Stromnachfrage aufzuzeigen. Lediglich auf der Fahrzeugebene wird die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität der Gesamtstromerzeugung („Strommix“) als Vergleichsgröße zur besseren Einordnung der Ergebnisse mit aufgeführt.

Wie im Kapitel 6 aufgezeigt, stellt der Umstand, ob für die zusätzliche Stromnachfrage von Elektromobilität zusätzliche Erneuerbare-Energien-Anlagen gebaut werden, die wirkmächtigste Einflussgröße auf die CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge dar. Ferner ist zu beobachten, dass Lademanagement – also die zeitliche Steuerung der Batterieladung – erheblichen Einfluss auf die Integration erneuerbarer Energien und somit auf die CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung haben kann.

In Tabelle 18 sind die Emissionsfaktoren für ausgewählte Stromerzeugungsoptionen aufgeführt. Diese bilden die Grundlage für die folgende Emissionsbilanzierung auf Fahrzeugebene (Abschnitt 7.3) und für den Pkw-Bestand (Abschnitt 7.4). Neben dem Fall ohne Zubau weiterer Erneuerbare-Energien-Anlagen wird der Fall des zusätzlichen Baus von Windkraftanlagen zur Deckung der Stromnachfrage von Elektromobilität diskutiert. Für beide Stromerzeugungsoptionen wird jeweils die Möglichkeit mit und ohne Lademanagement betrachtet. Zu Vergleichszwecken ist die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität der Gesamtstromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2020 und 2030 angeführt.

Tabelle 18: CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung für Elektromobilität [g CO<sub>2</sub>/kWh] – Effekt eines zusätzlichen Ausbaus von Erneuerbare-Energien-(EE-)Anlagen und von Lademanagement (LM); Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Intensität des deutschen Strommixes

|             | ohne zusätzlichen EE-Ausbau |        | mit zusätzlichem EE-Ausbau (Wind) |        | Vergleich: deutscher Strommix |
|-------------|-----------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
|             | ohne LM                     | mit LM | ohne LM                           | mit LM |                               |
| <b>2020</b> | 894                         | 888    | 54                                | 0      | 519                           |
| <b>2030</b> | 713                         | 752    | 62                                | 17     | 490                           |

### 7.3 CO<sub>2</sub>-Bilanz auf Fahrzeugebene

Die Treibhausgasbilanzierung auf Fahrzeugebene veranschaulicht die CO<sub>2</sub>-Minderung, die durch den Einsatz eines Plug-In-Hybrid-Pkw bzw. eines batterieelektrischen Fahrzeugs anstelle eines herkömmlichen verbrennungsmotorischen Pkw je gefahrenem Kilometer realisiert werden kann.

Exemplarisch wird der CO<sub>2</sub>-Bilanzvergleich der betrachteten Antriebstypen am Beispiel eines Fahrzeugs der Größenklasse „mittel“ und für das Jahr 2030 aufgezeigt. Die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung berücksichtigt den realen Energieverbrauch eines im Jahr 2030 neu zugelassenen Pkw

(Tabelle 19). Für Fahrzeuge mit (teil-)elektrischem Antrieb wird ferner ein mittlerer Batterieladewirkungsgrad von 90 % unterstellt. Der elektrische Fahranteil des Plug-In-Hybridfahrzeugs leitet sich als Durchschnittswert aus den Simulationen der Fahrzeugnutzung ab.

Tabelle 19: Spezifischer Energieverbrauch und elektrischer Fahranteil der Vergleichsfahrzeuge im Jahr 2030

|                            | <b>Otto-Pkw<br/>(CV)</b> | <b>Plug-In-Hybrid-Pkw<br/>(PHEV)</b> | <b>Batterieelektrischer<br/>Pkw (BEV)</b> |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|
| Realer Kraftstoffverbrauch | 5,4 l/100km              | 5,4 l/100km                          | –   |
| Realer Stromverbrauch      | –                        | 21 kWh/100km                         | 20 kWh/100km                              |
| Elektrischer Fahranteil    | 0 %                      | 67 %                                 | 100 %                                     |

Abbildung 34 veranschaulicht die Relevanz der Strombereitstellung auf die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektrofahrzeugen. Ohne den zusätzlichen Ausbau von Erneuerbare-Energien-Anlagen liegen die Gesamtemissionen von Plug-In-Hybrid- und batterieelektrischen Pkw im Jahr 2030 12 % bzw. 11 % über dem Emissionsniveau eines konventionellen Benzin-Pkw. Durch den zusätzlichen Ausbau von Windenergieanlagen könnten die Emissionen gegenüber einem herkömmlichen Vergleichsfahrzeug deutlich gesenkt werden: um 90 % für batterieelektrische Pkw und um 60 % für Plug-In-Hybrid-Pkw. Die direkten Emissionen des Plug-In-Hybridfahrzeugs bleiben unberührt durch die Art der Strombereitstellung, da diese im konventionellen Fahrzeugbetrieb bei der Verbrennung von Flüssigkraftstoff entstehen.

Unter Vernachlässigung der direkten Effekte von Elektromobilität auf die Stromwirtschaft wird häufig auch die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Intensität der Gesamtstromerzeugung herangezogen. In diesem Fall würden sich die spezifischen Fahrzeugemissionen um 13 % (Plug-In-Hybrid-Pkw) bzw. 24 % (batterieelektrischer Pkw) gegenüber einem konventionellen Vergleichsfahrzeug verringern.

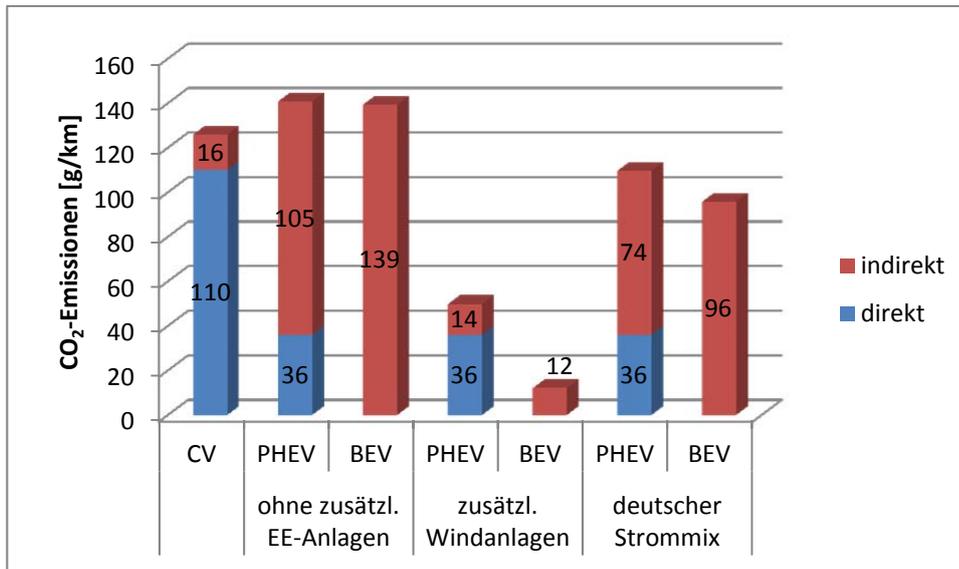


Abbildung 34: CO<sub>2</sub>-Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, **ohne** Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs der Größenklasse "mittel" mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischem Antrieb.

In Abbildung 35 wird zusätzlich der Effekt eines Lademanagement, das die Batterieladung auf möglichst preisoptimale Zeitpunkte verschiebt, für die beiden Möglichkeiten der Stromerzeugung aufgezeigt. Im Falle des unveränderten Kraftwerkparcs (ohne zusätzliche EE-Anlagen) würde sich das Emissionsniveau von Elektrofahrzeugen sogar noch weiter erhöhen. Ursache: die Batterieladung würde vorwiegend in Zeiten geringer Lastnachfrage verschoben und die Stromnachfrage durch Kraftwerke mit überdurchschnittlich hoher CO<sub>2</sub>-Intensität (Braun- & Steinkohle) befriedigt.

Ganz anders das Bild im Falle eines zusätzlichen Baus von Windenergieanlagen. Durch das Lademanagement kann die Integration des fluktuierenden Windstromangebots weiter optimiert werden, so dass in Konsequenz auch die CO<sub>2</sub>-Intensität der für Elektromobilität erzeugten Strommenge weiter sinkt (siehe auch Tabelle 18) und dieser nahezu emissionsfrei bereitgestellt werden kann. Daraus ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Vorteil gegenüber dem konventionellen Vergleichsfahrzeug von 65 % für ein Plug-In-Hybridfahrzeug und 97 % für das batterieelektrische Fahrzeugpendant.

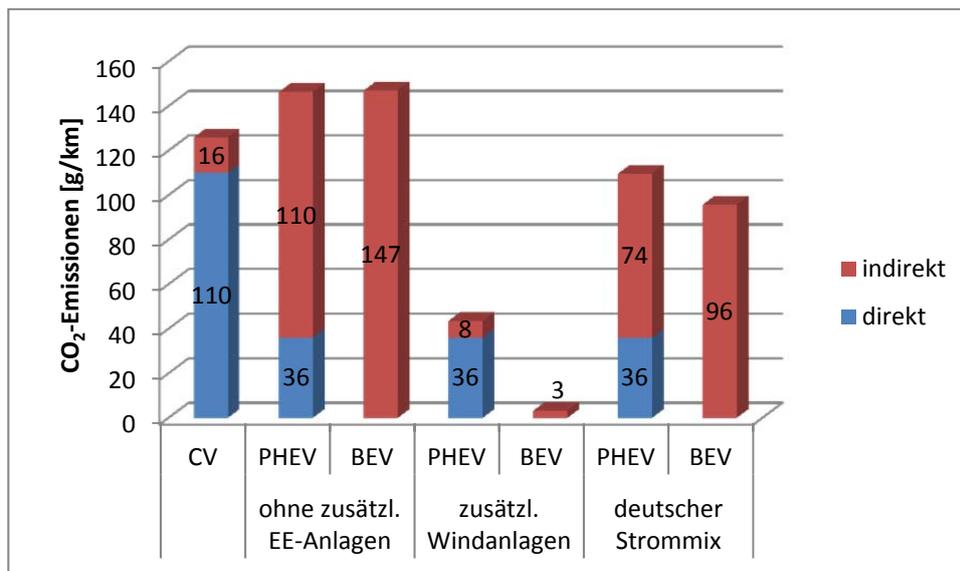


Abbildung 35: CO<sub>2</sub>-Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, **mit** Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs der Größenklasse "mittel" mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischem Antrieb.

Zunächst legt der Vergleich der spezifischen Emissionen im optimalen Fall eines zusätzlichen Ausbaus von regenerativen Energien den Schluss nahe, dass batterieelektrische Fahrzeuge auf Fahrzeugebene den höchsten CO<sub>2</sub>-Minderungsbeitrag bei der Substitution konventioneller Pkw erzielen können. Entscheidend für die Bestimmung der absoluten CO<sub>2</sub>-Bilanz auf Fahrzeugebene ist jedoch neben den spezifischen Emissionen, die Berücksichtigung der tatsächlichen Pkw-Fahrleistung. Denn erst das Produkt aus spezifischen Fahrzeugemissionen und der Fahrleistung quantifiziert die absolute Höhe der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Wie in Abschnitt 4.3 aufgezeigt, zeichnen sich batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu Plug-In-Hybridfahrzeugen durch eine um durchschnittlich etwa 40 % geringere Jahresfahrleistung aus. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass beim Einsatz eines batterieelektrischen Pkw anstelle eines konventionellen Fahrzeugs eine im Vergleich zum Plug-In-Hybrid-Pkw geringere Fahrleistung substituiert wird. In Abbildung 36 ist dieser Effekt für die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen am Beispiel der beiden elektrischen Antriebstypen und ihrer jeweiligen Jahresfahrleistung für den Fall einer Energieerzeugung aus zusätzlichen Windanlagen illustriert. Zwar erreicht auch hier das batterieelektrische Fahrzeug gegenüber einem herkömmlichen Pkw – dank nahezu emissionsfreier Strombereitstellung – mit 97 % eine deutlich höhere relative CO<sub>2</sub>-Minderung als das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug (65 %). Die absolute CO<sub>2</sub>-Einsparung pro Jahr liegt allerdings angesichts der höheren Fahrleistung im Falle des PHEV trotz eines konventionellen Fahranteils von 33 % mit 1.135 kg CO<sub>2</sub> / a um 13 % höher als für das batterieelektrische Fahrzeug (983 kg CO<sub>2</sub>-Einsparung pro Jahr).

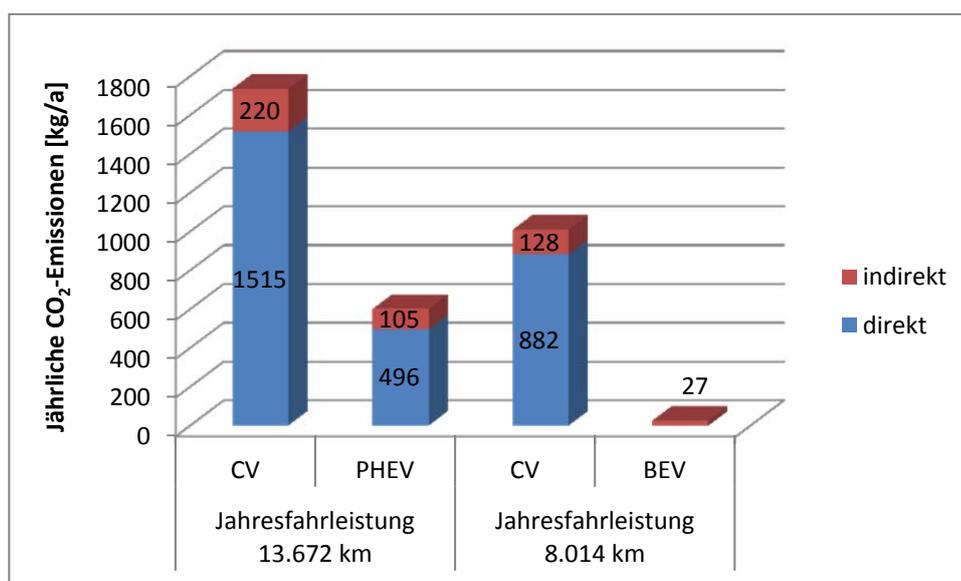


Abbildung 36: Vergleich der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines konventionellen Benzin-Pkw mit einem Plug-In-Hybrid- bzw. batterieelektrischen Pkw im Jahr 2030. (Emissionsfaktor der Stromerzeugung bei zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Energien (Wind) und bei Lademanagement)

## 7.4 CO<sub>2</sub>-Bilanz im Kontext des deutschen Pkw-Bestands

Die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Effekte von Elektromobilität im Kontext des deutschen Pkw-Gesamtbestands knüpft an die in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 diskutierte Bestands- und Fahrleistungsentwicklung für das Szenario Elektromobilität an und berücksichtigt die in Abschnitt 7.2 diskutierte Effizienzentwicklung von Personenkraftwagen bis zum Jahr 2030 und kombiniert diese mit der jeweiligen CO<sub>2</sub>-Intensität der Energiebereitstellung für konventionelle Kraftstoffe und Strom. Die Grundlage der Betrachtung ist der Vergleich einer Bestandsentwicklung ohne Elektromobilität mit einem Szenario, in dem Plug-In-Hybridfahrzeuge und batterieelektrische Pkw zunehmend konventionelle Otto- und Diesel-Pkw substituieren.

### *Entwicklung des Endenergiebedarf*

Wie Abbildung 37 veranschaulicht, verringert sich der Endenergiebedarf des Pkw-Bestands im Szenario Elektromobilität bis zum Jahr 2030 trotz weiter ansteigender Fahrleistung um 28 % auf etwa 1.000 PJ. Wesentlicher Treiber für diese Entwicklung ist insbesondere die deutliche Effizienzsteigerung der konventionellen Pkw. Der Bestand von etwa 5.870.000 Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 trägt zur Minderung des Endenergiebedarfs mit etwa 5 Prozentpunkten bei.

Durch die zunehmende Substitution von konventionellen Otto- und Diesel-Pkw verringert sich der Einsatz von Otto- und Dieselkraftstoff gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität bis zum Jahr 2030 um etwa 50 bzw. 60 PJ (Abbildung 38). Gleichzeitig steigt der Strombedarf bis zum Jahr 2030 auf rund 40 PJ. Durch den konventionellen Fahranteil von Plug-In-Hybridfahrzeugen entsteht zusätzlich eine neue Nachfrage nach Otto-Kraftstoff, die die Einsparungen bei konventionellen Otto-Pkw zu 80 % wieder kompensiert.

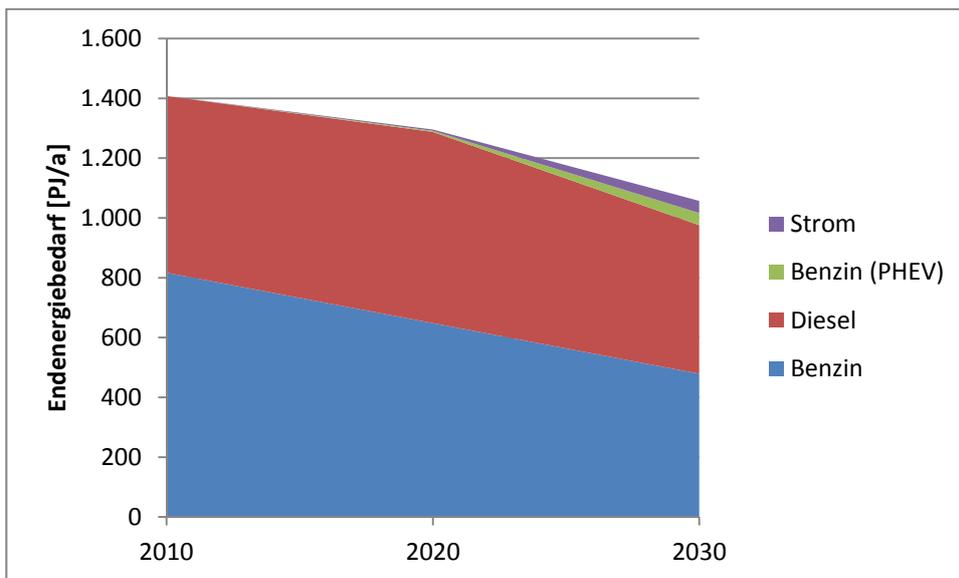


Abbildung 37: Endenergiebedarf des Pkw-Bestands im Szenario Elektromobilität

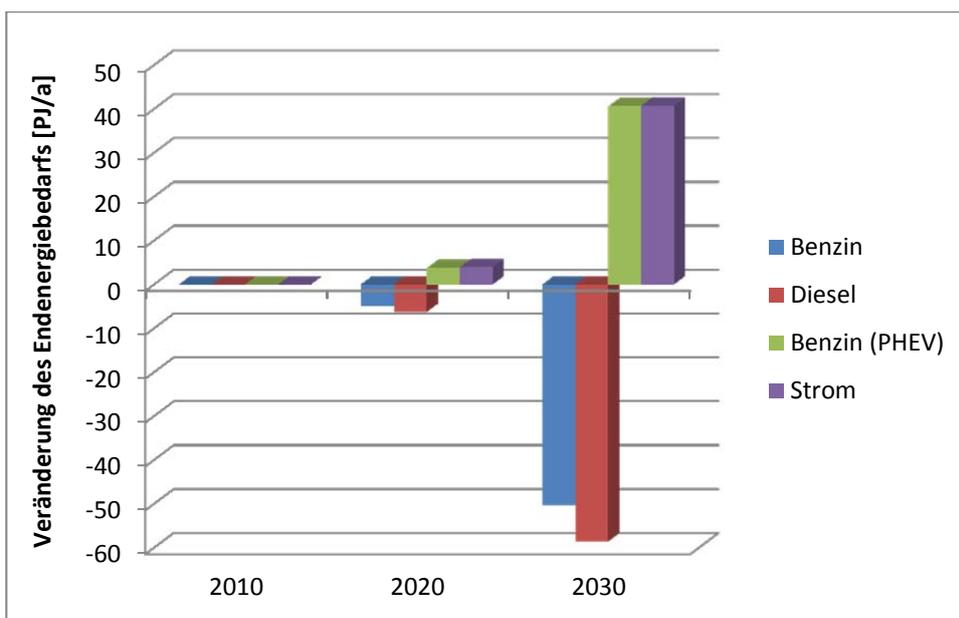


Abbildung 38: Veränderung des Endenergiebedarfs im Szenario Elektromobilität gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge

### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für das betrachtete Szenario Elektromobilität, welches bis zum Jahr 2020 einen Bestand von etwa 537.000 Elektrofahrzeuge (64.000 BEV / 473.000 PHEV) und im Jahr 2030 rund 5,8 Millionen Fahrzeuge (780.000 BEV / 5.080.000 PHEV) umfasst, die in den jeweiligen Segmenten konventionelle Pkw ersetzen, werden bei der Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Gesamteffekte auf den Pkw-Bestand zwei Energieerzeugungsoptionen berücksichtigt.

Neben einem Referenzfall ohne Elektromobilität wird der Effekt des Elektromobilitätsszenarios auf die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands zum Einen für den Fall eines zusätzlichen Ausbaus regenerativer Energien (Windanlagen) sowie zum Anderen ohne entsprechenden Zubau von Erneuerbare-Energien-Anlagen betrachtet. Auch hier sei nochmals erwähnt, dass entsprechend der Methodik der Strommarkt Betrachtung, die CO<sub>2</sub>-Intensität der Strombereitstellung sich jeweils auf die **zusätzliche** Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge bezieht und nicht die mittleren Emissionen der Gesamtstromerzeugung darstellt.

Wie das in Abbildung 39 veranschaulichte Ergebnis der Emissionsberechnung zeigt, führt Elektromobilität unter diesen Umständen nur im Falle eines zusätzlichen Ausbaus von Kapazitäten zur regenerativen Stromerzeugung zu einem CO<sub>2</sub>-Minderungseffekt. Andernfalls steigen die Gesamtemissionen sogar über die Referenzentwicklung ohne Elektromobilität.

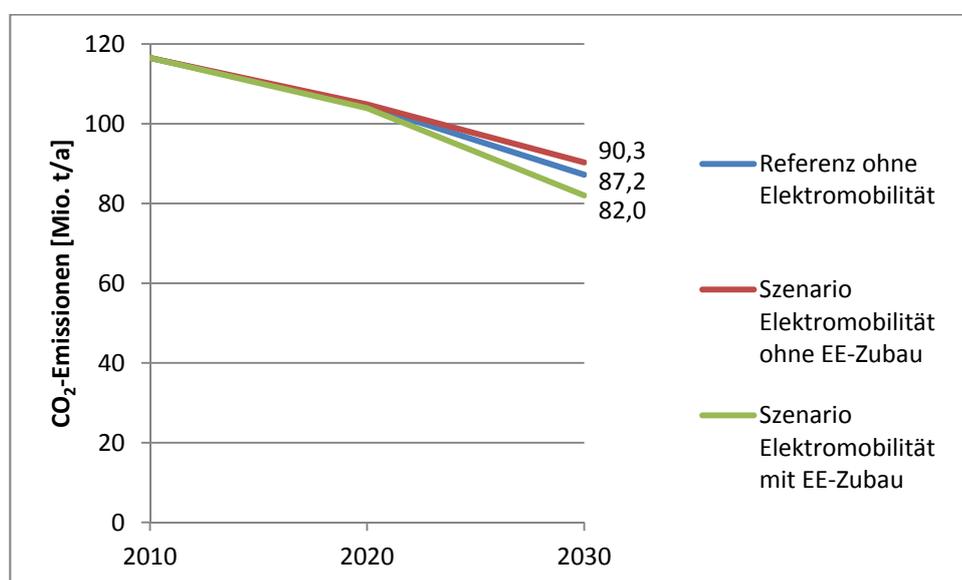


Abbildung 39: CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands im Referenzfall ohne Elektromobilität und im Szenario Elektromobilität für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen

Im Falle eines zusätzlichen Ausbaus von Erneuerbare-Energien-Anlagen sinken die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands durch den verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen um 0,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (2020) bzw. 5,2 Millionen Tonnen (2030). Dies bedeutet eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands in Deutschland um 0,6 % im Jahr 2020 und um 6,0 % im Jahr 2030. Ohne einen zusätzlichen Ausbau von Anlagen zur regenerativen Stromerzeugung würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge um 3,1 Millionen Tonnen bzw. 3,6 % im Jahr 2030 ansteigen.

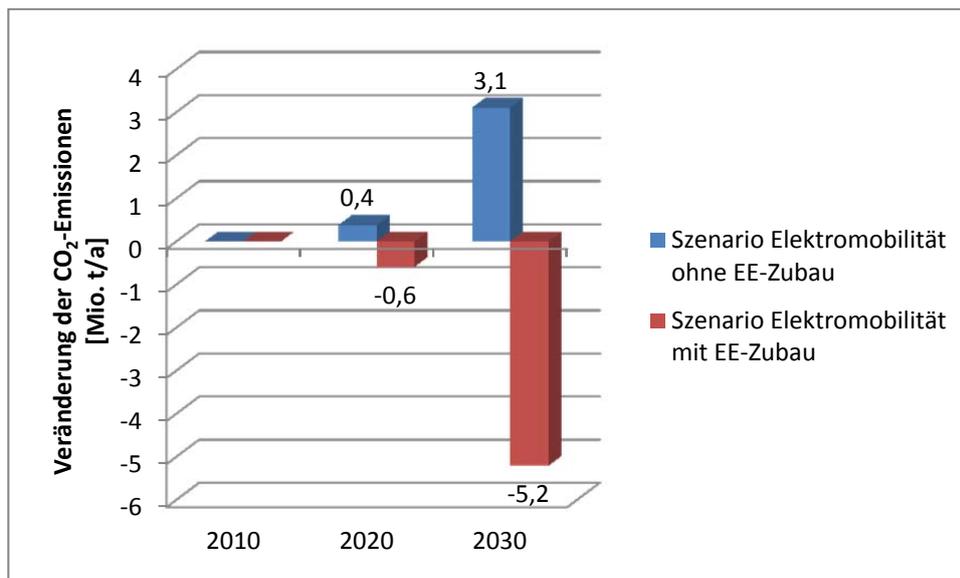


Abbildung 40: Veränderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands im Szenario Elektromobilität gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge

## 7.5 Exkurs: Mögliche Wechselwirkung zwischen Elektromobilität und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw

Wie in Abschnitt 7.2 erläutert, wird bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung des deutschen Pkw-Bestands für herkömmliche verbrennungsmotorische Fahrzeuge eine Effizienzentwicklung angenommen, die sich bis zum Jahr 2020 an der EU-Verordnung zu Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen [26] orientiert. In Anlehnung an TREMOD [12] wird für die deutsche Pkw-Neuzulassungsstruktur im Jahr 2020 ein Durchschnittswert von 108 g CO<sub>2</sub>/km unterstellt, welcher sich auf den EU-Zielwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km für die europaweiten Pkw-Neuzulassungen bezieht. Die ebenfalls aus TREMOD übernommene Fortschreibung eines Zielwertes von 95 g CO<sub>2</sub>/km für die Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2030 orientiert sich an der Annahme eines gesamteuropäischen Durchschnittswerts von 80 g CO<sub>2</sub>/km zu diesem Zeitpunkt. Dieser langfristige Zielwert ist bisher noch nicht rechtsverbindlich, gilt jedoch als eine realistische Umsetzungsvariante.

Den vorausgegangenen Szenariobetrachtungen (Abschnitt 7.3 und 7.4) liegt die Annahme zugrunde, dass die Effizienzentwicklung von verbrennungsmotorischen Pkw auf Basis der regulatorischen Vorgaben auf EU-Ebene unabhängig von der Entwicklung des Marktsegments der Elektrofahrzeuge erfolgt. Aus zwei Gründen verdient diese vereinfachende Annahme eine vertiefende Betrachtung. Zum einen zeigen die Szenariobetrachtungen, dass auch bei einem Anteil von knapp 6 Millionen Elektrofahrzeugen der Hauptteil der Minderung des Energiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die deutliche Effizienzsteigerung bei konventionellen Pkw zurückzuführen ist. Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass in den Szenarioanalysen zwar zunächst auf eine Betrachtung der Wechselwirkungen von Elektromobilität und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw verzichtet wurde, dass diese mit Bezug auf die Ausgestaltung der genannten EU-Verordnung jedoch durchaus naheliegend ist.

Im Folgenden wird dieser Sachverhalt näher erläutert und die möglichen Auswirkungen am Beispiel einer Extrembetrachtung veranschaulicht.

Da die EU-Verordnung zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen alle Antriebstypen umfasst, sich der Zielwert aber nur auf die direkten Emissionen der Fahrzeuge bezieht, werden die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung und insbesondere die Emissionen der Stromerzeugung nicht berücksichtigt. Entsprechend gehen batterieelektrische Pkw als emissionsfreie Fahrzeuge und Plug-In-Hybrid-Pkw nur mit den im verbrennungsmotorischen Modus emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Flottenwerts ein. Dies bedeutet jedoch auch, dass – anders als in der Szenariobetrachtung umgesetzt – eine Wechselwirkung zwischen dem Neuzulassungsanteil an Elektrofahrzeugen und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw wahrscheinlich ist, da Elektrofahrzeuge zunehmend zur Erreichung des CO<sub>2</sub>-Zielwerts beitragen und somit konventionelle Pkw einen etwas geringeren Beitrag leisten müssen. Unter der Annahme, dass die Effizienzsteigerung des Fahrzeugantriebs grundsätzlich mit Mehrkosten für die Hersteller verbunden ist, und auf Basis der Entwicklungen der vergangenen Jahre erscheint eine Übererfüllung der CO<sub>2</sub>-Zielwerte eher unwahrscheinlich.

Im Folgenden wurde die mögliche Wechselwirkung von Elektrofahrzeugen und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw am Beispiel des Szenarios Elektromobilität veranschaulicht (Abbildung 41). Batterieelektrische Pkw gehen gemäß Definition als Null-Emissions-Fahrzeuge in die Bestimmung des durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerts ein. Die für die Bilanzierung relevanten direkten Emissionen von Plug-In-Hybridfahrzeugen ergeben sich aus der Simulation der Fahrzeugnutzung. Für den betrachteten Anteil an Plug-In-Hybrid-Pkw im Szenario Elektromobilität ergibt sich ein Durchschnittswert von 43 bis 45 g CO<sub>2</sub>/km. Dieser bildet die Grundlage für die Berücksichtigung von Plug-In-Hybrid-Pkw bei der folgenden CO<sub>2</sub>-Grenzwertbetrachtung.

Unter der Annahme, dass der für die deutsche Pkw-Struktur anvisierte CO<sub>2</sub>-Zielwert nicht übererfüllt wird, könnte sich die Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw bis 2020 gegenüber dem Referenzfall ohne Elektromobilität folglich leicht abschwächen. Der mittlere CO<sub>2</sub>-Wert der konventionellen Pkw-Neuzulassungen würde im Jahr 2020 113 g CO<sub>2</sub>/km betragen und damit 4,4 % über dem Wert bei einer Entwicklung ohne Elektrofahrzeuge liegen. Unter der Annahme, dass bis 2030 für die Pkw-Neuzulassungen in Deutschland ein Durchschnittswert von 95 g CO<sub>2</sub>/km als Zielwert zu erreichen ist (entspricht einem EU-weiten Wert von 80 g CO<sub>2</sub>/km), würde der Druck zur Effizienzsteigerung bei konventionellen Pkw – angesichts eines zunehmenden Anteils an Elektrofahrzeugen mit geringen oder keinen direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen – weiter abnehmen und die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der konventionellen Pkw-Neuzulassungen könnten gegenüber der Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge um etwa 25 % auf 119 g CO<sub>2</sub>/km ansteigen.

Die Effizienzentwicklung von Pkw, die sich an der Erreichung eines durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Zielwertes für die Pkw-Neuzulassungen in einem bestimmten Jahr orientiert, führt nicht automatisch zu einer entsprechend hohen Emissionsminderung im realen Fahrzeugbetrieb. Hauptgrund hierfür ist, dass bei der CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz die fahrzeugspezifische Energieeffizienz mit der jeweiligen Jahresfahrleistung gewichtet wird, dies bei der Ermittlung des durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Flottenwerts jedoch nicht geschieht. Das bedeutet, dass beispielsweise eine überdurchschnittlich Effizienzsteigerung in einem Fahrzeugsegment mit durchschnittlich geringer Jahresfahrleistung zwar zu einer signifikanten Minderung des CO<sub>2</sub>-Flottenwerts beiträgt, sich dies in der realen Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch nicht in

gleicher Weise niederschlägt. Ähnliches gilt für batterieelektrische Fahrzeuge: diese werden bei der Bestimmung des Flottenwerts zwar mit Null-Emissionen berücksichtigt, im Fahrzeugbestand fällt deren Beitrag zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen angesichts einer unterdurchschnittlichen Jahresfahrleistung weniger stark ins Gewicht.

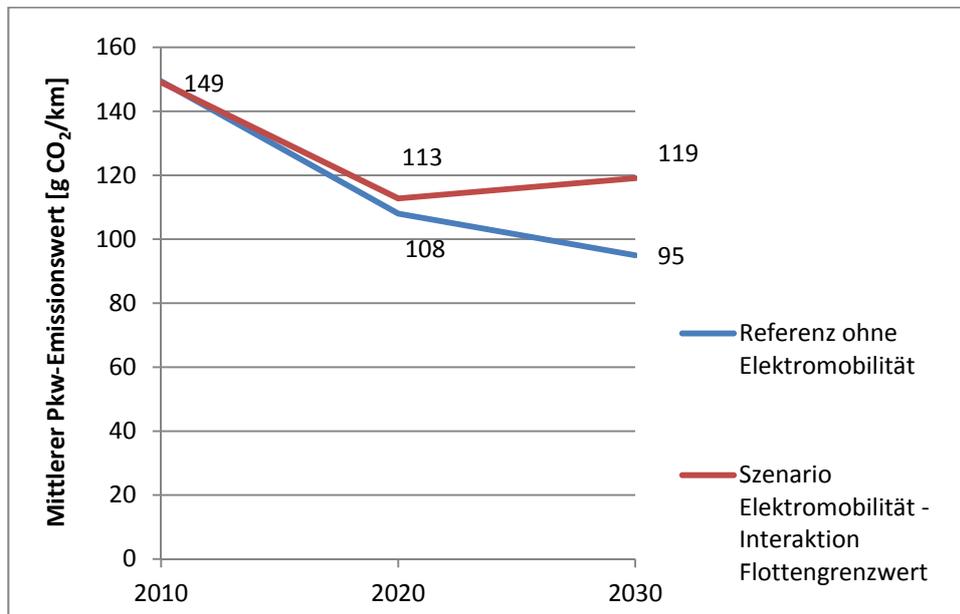


Abbildung 41: Mögliche Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw-Neuzulassungen unter Berücksichtigung des zunehmenden Anteils an Elektrofahrzeugen

Wie sich die skizzierte mögliche Interaktion von Elektromobilität und der Effizienzentwicklung von konventionellen verbrennungsmotorischen Pkw auf die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands für den Fall der Marktszenarios Elektromobilität darstellen könnte, wurde im Rahmen einer Extrembetrachtung untersucht. Dabei werden die jeweiligen Effekte für den Pkw-Bestand im Vergleich für eine Entwicklung mit und ohne Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen des Flottengrenzwerts auf die Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw am Beispiel des Marktszenarios Elektromobilität dargestellt.

Durch die moderatere Effizienzentwicklung konventioneller Pkw bei einer entsprechenden Interaktion zwischen Elektromobilität und Flottengrenzwert würde der Endenergiebedarf des Pkw-Bestands gegenüber einer Entwicklung ohne Berücksichtigung der beschriebenen Wechselwirkung um 1,6 % (2020) bzw. 13,8 % (2030) höher ausfallen. Folglich würden auch die Gesamtemissionen angesichts des höheren Kraftstoffverbrauchs von konventionellen Pkw 1,3 % (2020) bzw. 9,7 % (2030) über den Werten einer Entwicklung ohne Berücksichtigung der möglichen Interaktion von Elektromobilität und Flottengrenzwert liegen. In Bezug zum Referenzfall ohne Elektromobilität würden trotz der nahezu emissionsfreien Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands 0,8 % (2020) und 3,2 % (2030) über dem Niveau einer Entwicklung ohne Elektrofahrzeuge liegen. Das heißt, dass bei unveränderten Annahmen zur Ausgestaltung der europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionsnorm für Pkw-Neuzulassungen und einer Fortschreibung entsprechend der diskutierten Annahmen bis zum Jahr 2030 selbst bei einer nahezu emissionsfreien Strombereitstellung für Elektromobilität die

Gesamtemissionen des Pkw-Bestands für das Szenario Elektromobilität über denen einer Alternativentwicklung ohne Elektrofahrzeugen liegen könnten.

An dieser Stelle sei nochmals betont, dass der dargestellte Sachverhalt nur eine mögliche Interaktion von Elektrofahrzeugen und der Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw unter der Annahme einer exakten Erfüllung des CO<sub>2</sub>-Zielwerts darstellt. Insbesondere die dargestellten langfristige Effekte bis zum Jahr 2030 haben lediglich illustrativen Charakter, da die langfristige Weiterentwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionsnorm für Pkw-Neuzulassungen und die konkrete Definition eines Zielwerts – der möglicherweise von der hier dargestellten Entwicklung abweicht – zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sicher prognostiziert werden kann. Dennoch kann der geführte Exkurs aufzeigen, welche Interaktionen bei einer unveränderten Fortschreibung der regulatorischen Rahmenbedingungen bei einer dynamischen Entwicklung von Elektromobilität bis zum Jahr 2030 denkbar wären und welche Konsequenzen auf die Emissionsbilanz des Pkw-Bestands die Folge sein könnten.

Sollte sich Elektromobilität bis zum Jahr 2030 ähnlich dynamisch wie im hier aufgezeigten Szenario am Markt durchsetzen, so zeigen die Analysen auf, dass die Fortschreibung der Flottengrenzwerte unter Berücksichtigung der zunehmenden Anzahl von Elektrofahrzeugen deutlich ambitionierter vorgenommen werden müsste, um auch langfristig eine deutliche Effizienzsteigerung aller Pkw-Antriebsarten sicherzustellen.

## Zusammenfassung

### **OPTUM: Marktpotenziale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität**

Im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM „Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“ wurde ein integrativer Ansatz zur Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektrofahrzeugen verfolgt, der neben der fahrzeugseitigen Betrachtung auch die Interaktionen mit dem Energiemarkt berücksichtigt. Dieses Vorgehen trägt dem Umstand Rechnung, dass Elektrofahrzeuge – im Unterschied zu verbrennungsmotorischen Pkw – im Betrieb keine direkten Emissionen verursachen, dass aber bei der Stromerzeugung relevante Mengen an CO<sub>2</sub> entstehen können. Große Unterschiede ergeben sich je nachdem, ob die zusätzliche Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen aus (zusätzlichen oder ansonsten ungenutzten) erneuerbaren oder aus fossilen Energien erzeugt wird. Ein konsistenter Vergleich von Elektrofahrzeugen und konventionellen Pkw ist daher nur unter Berücksichtigung der Gesamtemissionsbilanz inklusive der Energiebereitstellung möglich.

Wie stark elektrische Antriebe zum Klimaschutz beitragen können, hängt neben der Art der Stromerzeugung davon ab, wie viele Elektrofahrzeuge sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im Markt befinden, wie hoch deren Fahrleistung und der sich daraus ableitende reale Gesamtstrombedarf ist und welche konventionellen Fahrzeuge im Bestand ersetzt werden.

Um die CO<sub>2</sub>-Effekte einer verstärkten Einführung von Elektrofahrzeugen umfassend bewerten zu können, wurden im Forschungsvorhabens OPTUM daher folgende Arbeitsschritte formuliert:

- » Analyse der Akzeptanz und Attraktivität von Elektrofahrzeugen
- » Ableitung von Marktpotenzialen für Elektrofahrzeuge
- » Betrachtung der Interaktion mit dem Energiesektor
- » Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Elektromobilität.

### **Marktszenario Elektromobilität**

Eine plausible Simulation der Marktentwicklung von Elektromobilität bildet die Grundlage für die Bestimmung möglicher CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale von Elektrofahrzeugen im Pkw-Bestand.

Für die Ableitung von Szenarien zur Marktentwicklung von Elektromobilität bis zum Jahr 2030 wurden im Rahmen von OPTUM drei wesentliche Einflussparameter berücksichtigt. Auf Basis empirischer Mobilitätsdaten (MiD 2008) wurde differenziert nach drei Größenklassen ein Maximalpotenzial für Elektrofahrzeuge bestimmt, das den auf Grund seiner Nutzungsmuster theoretisch substituierbaren Anteil des bundesdeutschen Pkw-Bestands beschreibt. Dieses berücksichtigt die technischen Restriktionen von Elektrofahrzeugen und bestimmt, welche Fahrzeuge unter den zuvor definierten Rahmenbedingungen bei unveränderten Einsatzmustern das bestehende Mobilitätsbedürfnis weiterhin befriedigen könnten.

Neben der Betrachtung technischer Einsatzrestriktionen spielt die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei potenziellen Käufern eine entscheidende Rolle für die Marktentwicklung von Elektromobilität. Im Rahmen einer empirischen Akzeptanzanalyse wurde daher ermittelt, unter welchen Umständen sich Pkw-Nutzer für ein Elektrofahrzeug entscheiden würden. Aus

der Kombination von Maximalpotenzial und Akzeptanz ergibt sich ein Marktpotenzial, das die Obergrenze des möglichen Marktanteils von Elektrofahrzeugen im Betrachtungszeitraum darstellt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Angebotsentwicklung („Technologiediffusion“), welche dem Umstand Rechnung trägt, dass sich die Verfügbarkeit einer neuen Technologie im Markt erst mit der Zeit entwickelt, wurde die tatsächlich realisierbare Marktentwicklung von Elektromobilität jahresscharf bestimmt und in Anteile an den jährlichen Pkw-Neuzulassungen übersetzt.

Die Analyse der Pkw-Nutzungsmuster zeigt, dass sowohl Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge als auch batterieelektrische Pkw die im Alltag anfallenden Mobilitätsbedürfnisse decken können. Allerdings können batterieelektrische Pkw ohne Zwischenladung nicht für unregelmäßig lange Fahrten genutzt werden. Das Potenzial für batterieelektrische Fahrzeuge ist daher stärker eingeschränkt. Ebenfalls mindernd auf das Potenzial von batterieelektrischen Pkw wirkt sich die Annahme aus, dass diese vermutlich bis zum Jahr 2030 lediglich bis zur Kompaktklasse verfügbar sein werden. Insbesondere große Fahrzeuge können daher nicht durch rein elektrische Pkw ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung des heutigen Mobilitätsverhaltens liegt das Maximalpotenzial für batterieelektrische Pkw bezogen auf den Gesamtbestand bei unter 10 %. Das Maximalpotenzial von Plug-In-Hybriden ist nur durch den Ausbau der öffentlichen Infrastruktur begrenzt und liegt im betrachteten Szenario im Jahr 2030 bei rund 85 % aller Fahrzeuge.

Die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen wurde über eine Simulation der Kaufentscheidung anhand acht verschiedener Parameter näher untersucht. Zur Auswahl standen den rund 1.500 potenziellen Neuwagenkäufern konventionelle Pkw, Plug-In-Hybridfahrzeuge und rein batterieelektrische Pkw. Im betrachteten Szenario würden sich im Jahr 2020 rund 60 % und im Jahr 2030 etwa 63 % für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb entscheiden – wobei der Anteil an Plug-In-Hybrid-Pkw den Anteil batterieelektrischer Pkw übertrifft.

Die Verknüpfung von Maximalpotenzial und Akzeptanz zeigt, dass in den meisten Fahrzeugklassen das Potenzial durch die Akzeptanz begrenzt ist. Das Marktpotenzial steigt von 49 % in 2020 auf knapp 57 % in 2030, was vor allem an einer steigenden Akzeptanz bei geringeren Batteriekosten und kürzeren Ladedauern liegt. Die Verfügbarkeit von Ladestationen im semi-öffentlichen bzw. öffentlichen Raum begrenzt insbesondere das Potenzial für Pkw-Nutzer ohne eigenen Stellplatz auf dem Grundstück.

Unter Berücksichtigung der Angebotsentwicklung mittels Technologiediffusion kann die tatsächliche Marktentwicklung quantifiziert werden. Im Marktszenario Elektromobilität werden im Jahr 2020 fast 200.000 Elektrofahrzeuge neu zugelassen, im Jahr 2030 bleibt die Anzahl der elektrischen Pkw-Neuzulassungen nur knapp unter der Millionenmarke und stellt damit 38 % der Gesamtzulassungen im Jahr 2030 dar. Der größte Anteil der elektrischen Neuzulassungen sind Plug-In-Hybrid-Pkw mit 87 %. Insbesondere in den ersten Jahren nach dem Markteintritt sind die Stückzahlen sehr gering. Trotzdem ist anzumerken, dass die jährliche Wachstumsrate im Szenario deutlich über durchschnittlichen Zuwachsraten von Technikinnovationen im Automobilssektor in der jüngeren Vergangenheit liegt und damit eine ambitionierte Marktentwicklung darstellt.

Dies spiegelt sich auch in der Bestandsentwicklung wider. Im Marktszenario Elektromobilität nimmt die Dynamik von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf deutlich zu: bis 2020 befinden sich etwas mehr als 500.000 Elektrofahrzeuge im Bestand. Dieser steigt dann bis 2030 auf etwa 5,9 Millionen an. Im Jahr 2022 wird die Millionenmarke im Bestand überschritten. Damit

erreichen Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 einen Anteil am Pkw-Bestand von rund 14 %. Mit über 80 % wird der Bestand an Elektrofahrzeugen von Plug-In-Hybridfahrzeugen dominiert.

Die durch Elektrofahrzeuge substituierbare Fahrleistung bestimmt maßgeblich den zusätzlichen Strombedarf sowie die möglichen CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale. Das Ergebnis der Pkw-Nutzungsanalyse zeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Pkw desselben Segments eine im Durchschnitt 40 % geringere Jahresfahrleistung haben. Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge erreichen dagegen die Jahresfahrleistung von konventionellen Pkw. Hiervon werden – wie die Simulationsergebnisse zeigen – im Durchschnitt jedoch nur zwei Drittel im elektrischen Fahrmodus zurückgelegt, da insbesondere bei langen Fahrten der Verbrennungsmotor zum Einsatz kommt. Die Fahrleistung aller Elektrofahrzeuge – inklusive dem konventionellen Fahranteil – erreicht im Jahr 2020 1,1 % und im Jahr 2030 11 % der Pkw-Gesamtfahrleistung. Die rein elektrische Fahrleistung stellt jedoch nur 0,8 % (2020) bzw. knapp 8 % (2030) dar.

### **Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor**

Für die Klimaverträglichkeit von Elektromobilität ist ein entscheidender Faktor, in welchen Kraftwerken der Strom zur Ladung der Batterien produziert wird, denn je nach Energieträger sind mit der Stromproduktion unterschiedlich hohe Treibhausgasemissionen verbunden. Je nachdem, in welcher Zeit – und damit in welcher Angebots- und Nachfragesituation – der Verbrauch für die Batterieladung auftritt, kommen unterschiedliche Kraftwerke zum Einsatz, um diesen zusätzlichen Verbrauch zu decken. Die zeitliche Struktur der Nachfrage ist deshalb für den Kraftwerkseinsatz entscheidend. Abgeleitet aus detaillierten realen Pkw-Nutzungsdaten werden deshalb aggregierte typische Wochen-Nutzungsprofile für Elektrofahrzeuge generiert. Diese Fahrzeugnutzungsprofile werden in das Strommarkt-Modell PowerFlex eingespeist.

Aus der Differenz zwischen unterschiedlichen Szenarien mit Elektromobilität und einem Basisszenario ohne Elektromobilität wird ermittelt, welche Kraftwerke den zusätzlich benötigten Strom produzieren, und wie hoch die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind, die aus dem gestiegenen Brennstoffeinsatz resultieren.

Das PowerFlex-Modell wurde im Rahmen dieses Projekts um ein Modul zur detaillierten Abbildung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Stromerzeugung erweitert. Darin kann der Stromverbrauch für die Batterieladung der Fahrzeuge entweder ohne Lademanagement oder mit einem preisoptimierten Lademanagement in die Modellierung des Strommarkts integriert werden.

Die zeitaufgelöste Analyse zeigt, dass ohne Lademanagement durch gleichzeitiges Laden vieler Fahrzeuge hohe Lastspitzen auftreten, für deren Deckung der Einsatz teurer Reservekraftwerke oder Stromimporte notwendig ist. Um solche Nachfragespitzen zu vermeiden, ist ein preisoptimiertes Lademanagement sinnvoll. Auch erhöht ein solches Lademanagement den Anteil erneuerbarer Energien am zusätzlich erzeugten Fahrstrom, falls es nutzbare, bisher nicht integrierbare erneuerbare Stromüberschüsse gibt. Im betrachteten Zeithorizont bis 2030 sind solche Überschüsse jedoch noch gering und reichen in Kombination mit den Restriktionen aus der Fahrzeugnutzung nicht aus, um den Verbrauch der Fahrzeuge zu decken.

Das Lademanagement steigert auch den Anteil an tendenziell emissionsintensivem Strom aus klassischen Grundlastkraftwerken am Fahrstrom, solange der Kraftwerkspark unverändert bleibt. Werden jedoch dem Modell zusammen mit der Elektromobilität zusätzliche erneuerbare

Energien zur Verfügung gestellt, die rechnerisch den jährlichen Verbrauch der Elektrofahrzeuge decken können, ändert sich dies. In Kombination mit Lademanagement ist der gegenüber dem Basisszenario zusätzlich produzierte Fahrstrom dann vollständig erneuerbar. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren dieser zusätzlichen Stromproduktion sind dann nahe Null. Für den Klimanutzen von Elektrofahrzeugen ist der Bau zusätzlicher erneuerbarer Kapazität somit zentral.

Ferner zeigen die Ergebnisse der Strommarktmodellierung, dass der Beitrag von Elektromobilität zur Erhöhung der Flexibilität im Stromsystem und zur Integration erneuerbarer Energien auch im Kontext mit anderen Flexibilitätsoptionen, wie beispielsweise anderen intelligenten Verbrauchern und Speichern oder dem Netzausbau, betrachtet werden sollte.

### **CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von Elektromobilität**

Da im Falle von Elektrofahrzeugen vor allem die Strombereitstellung ausschlaggebend für die Emissionsbilanz ist, erfordert der Emissionsvergleich verschiedener Antriebsoptionen eine Gesamtbetrachtung (Well-to-Wheel-Ansatz), die sowohl die direkten als auch die indirekten Emissionen des Fahrzeugantriebs berücksichtigt. Für den Vergleich auf Einzelfahrzeugebene werden die Ergebnisse der Strommarktmodellierung genutzt und die Treibhausgasintensität der Strombereitstellung mit der Stromnachfrage entsprechend der ermittelten Nutzungsprofile gekoppelt. Nur so ist ein konsistenter Vergleich konventioneller und elektrischer Pkw möglich. Neben der ermittelten CO<sub>2</sub>-Intensität der zusätzlichen Stromerzeugung werden auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der konventionellen Kraftstoffbereitstellung mit einbezogen, da sich diese über die Zeit vor allem auf Grund einer zunehmenden Biokraftstoffbeimischung ändern. Ferner ist zu beachten, dass ein konsistenter Vergleich berücksichtigen muss, dass auch konventionelle Vergleichsfahrzeuge ihre Energieeffizienz bis 2030 noch deutlich steigern werden.

Auf Fahrzeugebene ergibt sich für ein Beispielfahrzeug der Größenklasse „mittel“ dann folgendes Bild: Ohne zusätzliche Erneuerbare-Energien-Anlagen liegt das Emissionsniveau von Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 mehr als 10 % über den Emissionen eines Pkw mit Verbrennungsmotor. Bei der Nutzung von Strom aus zusätzlichen Erneuerbare-Energien-Anlagen würden die Gesamtemissionen von Plug-In-Hybrid-Pkw 60 % und die von batterieelektrischen Pkw 90 % unter denen eines konventionellen Fahrzeugs liegen. Lademanagement kann im Falle eines zusätzlichen Ausbaus erneuerbarer Energien die Integration von regenerativ erzeugtem Strom weiter verbessern und somit den Emissionsvorteil gegenüber konventionellen Pkw um weitere fünf bis sieben Prozentpunkte steigern. Da die jährliche Emissionseinsparung jedoch fahrleistungsabhängig ist und batterieelektrische Pkw eine deutlich geringere Jahresfahrleistung als Plug-In-Hybrid-Pkw haben, liegt die absolute Emissionseinsparung im günstigsten Fall – also beim Zubau erneuerbarer Energien – bei Plug-In-Hybridfahrzeugen mit etwa 1.100 kg um 13 % höher als bei batterieelektrischen Pkw.

Betrachtet man den Bestand an Elektrofahrzeugen im Kontext des Pkw-Gesamtbestands bis zum Jahr 2030, so ergibt sich im Szenario Elektromobilität eine Minderung des Endenergiebedarfs des Pkw-Verkehrs in Deutschland gegenüber heute von 28 % – trotz weiter ansteigender Fahrleistung. Der Bestand an knapp 6 Millionen Elektrofahrzeugen trägt allerdings nur mit etwa 5 Prozentpunkten zur Minderung bei, der Hauptanteil wird auch bis 2030 durch die Effizienzentwicklung von konventionellen Pkw erbracht.

Elektrofahrzeuge substituieren im Bestand konventionelle Fahrzeuge und deren Fahrleistung. Im Falle einer Energieerzeugung aus zusätzlichen Anlagen aus erneuerbaren Energien kann

im Jahr 2030 von nahezu emissionsfreiem elektrischem Fahren ausgegangen werden. In diesem Fall können die Emissionen des Pkw-Bestands um 0,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2020 bzw. 5,2 Millionen Tonnen im Jahr 2030 gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität gesenkt werden. Dies entspricht einer Minderung der Gesamtemissionen um 0,6 % bis zum Jahr 2020 bzw. 6,0 % bis zum Jahr 2030. Ohne zusätzlichen Erneuerbaren-Energien-Ausbau würden die Gesamtemissionen im Jahr 2030 hingegen mit 3,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> um 3,6 % über dem Referenzfall liegen.

### **Fazit**

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass nur beim Einsatz zusätzlicher erneuerbarer Energien eine deutlich positive CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektrofahrzeugen erreicht wird. Trotzdem wird Elektromobilität – angesichts zunächst geringer Bestandszahlen und einem niedrigen Fahrleistungsanteil – kurz- bis mittelfristig nur einen geringen Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Klassische Antriebstechnologien und Minderungsmaßnahmen dürfen daher nicht außer Acht gelassen werden – sie werden in den kommenden zwanzig Jahren den größten Beitrag zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands liefern. Für den langfristigen Klimaschutz ist die Entwicklung und frühzeitige Erprobung alternativer Antriebstechnologien jedoch unverzichtbar. Hinzu kommt, dass die Einbettung von Elektromobilität in alternative Mobilitätskonzepte große Potenziale für klima- und umweltverträglicheren Verkehr bergen könnte. Veränderte Nutzungseigenschaften von Elektrofahrzeugen, die heute noch als Hemmnis für deren Markterfolg wahrgenommen werden, könnten gleichzeitig auch den Ausgangspunkt für neue Mobilitätskonzepte und eine veränderte „Mobilitätskultur“ der Zukunft darstellen und somit weitaus tiefgreifendere Auswirkungen auf die Mobilität von morgen haben als heutzutage noch angenommen wird.

Insgesamt wird es nur eine Kombination aus einer deutlichen Effizienzsteigerung der konventionellen Verkehrsmittel, dem verstärkten Einsatz alternativer Antriebe – darunter auch Elektromobilität als wichtiger Technologie – und alternativer Kraftstoffe in Verbindung mit einem veränderten Mobilitätsverhalten ermöglichen, die langfristigen Klimaschutzziele zu erreichen und eine nachhaltige Mobilität in Zukunft zu sichern.

## Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt: *Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2010*. Umweltbundesamt, 2011.
- [2] BVU: *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. München, Freiburg, 2007.
- [3] Institut für sozial-ökologische Forschung: *OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Ergebnisbericht: Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos*, 2011.
- [4] DLR, Fraunhofer; IWES; InfE: *Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. 2010.
- [5] EWI; GWS; Prognos: *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Basel, Köln, Osnabrück, 2010.
- [6] infas, DLR: *MiD 2008 Mobilität in Deutschland 2008*. 2008.
- [7] M. A. Kromer; J. B. Heywood: *Electric Powertrains : Opportunities and Challenges in the U. S. Light-Duty Vehicle Fleet*. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [8] United States Environmental Protection Agency: *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions , and Fuel Economy Trends : 1975 Through 2010*. 2010.
- [9] G. Muraleedharakurup; A. McGordon; J. Poxon; P. Jennings: *Building a better business case: the use of non-linear growth models for predicting the market for hybrid vehicles in the UK*. University of Warwick, 2010.
- [10] A. Vyas; D. Santini; L. Johnson: *Plug-in hybrid electric vehicles; potential for petroleum use reduction: issues involved in developing reliable estimates*. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2009.
- [11] KBA: *Fahrzeugzulassungen - Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen - Jahr 2010*. 2010.
- [12] ifeu: *Fortschreibung und Erweiterung " Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5 )*. Heidelberg, 2010.
- [13] KBA: *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2011*. 2011. [Online]: [http://www.kba.de/cln\\_033/nn\\_125398/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2011\\_\\_b\\_\\_jahre\\_sbilanz.html#rechts](http://www.kba.de/cln_033/nn_125398/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2011__b__jahre_sbilanz.html#rechts).
- [14] infas; DLR: *Mobilität in Deutschland 2008*. 2008.

- [15] H. Hautzinger; W. Stock; K. Mayer; J. Schmidt; D. Heidemann: *Fahrleistungserhebung 2002 Band 1: Inländerfahrleistung 2002 - Teil: Begleitung und Auswertung - Band 1: Inländerfahrleistung 2002*. Heilbronn, Mannheim, 2004.
- [16] N. Richter: *Persönliche Email vom 04.08.2011: Daten aus TREMOD 5.22*. Umweltbundesamt, 2011.
- [17] F. C. Matthes et al.: *Politiksznarien für den Klimaschutz VI (unveröffentlicht; in Bearbeitung)*. Berlin, 2011.
- [18] Öko-Institut: *GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.7*. Öko-institut e.V., 2011.
- [19] F. C. Matthes; S. Gores; R. O. Harthan; L. Mohr; G. Penninger: *Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel*. 2009.
- [20] Entso-e: *Consumption Data*. 2008. [Online]: <https://www.entsoe.eu/db-query/country-packages/production-consumption-exchange-package/>.
- [21] Umweltbundesamt; Fraunhofer IWES: *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Dessau-Roßlau, 2010.
- [22] Bundesregierung: *Regierungsprogramm Elektromobilität*. 2011.
- [23] J. Bömer; K. Burges; C. Nabe: *Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach EEG 2009 - Auswirkungen auf die Windenergieerzeugung im Jahr 2009*. 2011.
- [24] Öko-Institut; DLR: *RENEWABILITY „ Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030 “ Teil 1: Methodik und Datenbasis*. Berlin: 2009.
- [25] Europäische Kommission: *Bericht der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, Überwachung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer Personenkraftwagen in der EU: Daten des Jahres 2009*. Brüssel: 2010.
- [26] EU: *Verordnung (EG) Nr.443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. 2009.
- [27] NPE: *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität - Anhang*. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, 2011.

## Anhang A: Szenarioannahmen

Tabelle (Anhang) 1: Rahmenbedingungen für Elektromobilität

| Kategorie   | Annahme   |
|---|---|
| <b>Für elektrische Pkw geeignete KBA-Segmente</b> | City-BEV: Mini / BEV: Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse, Mini-Van<br>PHEV: alle   |
| <b>Nominelle elektrische Reichweite</b>           | City-BEV: 100 km / BEV: 160 km / PHEV: 50 km <sup>a</sup>   |
| <b>Mindestreserve Batterie</b>                    | City-BEV: 15 km / BEV: 20 km  |
| <b>Verbrauch Nebenaggregate</b>                   | 10 % von nominellen Energieverbrauch  |
| <b>Nutzbare elektrische Reichweite</b>            | City-BEV: 75 km / BEV: 124 km / PHEV: 45 km   |
| <b>Ladeleistung</b>                               | Eigenes Grundstück & Arbeitsstelle: 3 kW (2020) / 7 kW (2030)<br>Restliche Standorte: 11 kW (2020 & 2030)   |
| <b>Ladewirkungsgrad</b>                           | 90 %  |
| <b>Ladekurve</b>                                  | Ab 90 % Batteriefüllstand verringert sich die maximale Ladeleistung auf 80 % der Ladeleistung des jeweiligen Standortes.                                |
| <b>Ladeinfrastrukturdichte</b>                    | 30 % (2020) / 50 % (2030) der Personen ohne Stellplatz auf dem eigenem Grundstück besitzen die Möglichkeit der regelmäßigen Ladung im öffentlichen Raum |
| <b>Batterieentladungstiefe</b>                    | 80 %  |
| <b>Batteriekosten</b>                             | 280 €/kWh (2020) / 230 €/kWh (2030)   |
| <b>Benzinpreis</b>                                | 1,52 €/l (2020) / 1,69 €/l (2030)   |
| <b>Strompreis (Fahrzeugnutzung)</b>               | 0,217 €/kWh (2020) / 0,222 €/kWh (2030)   |
| <b>Mobilitätsverhalten</b>                        | Das Mobilitätsverhalten ändert sich nur unwesentlich bis ins 2030.<br>Es werden jährlich maximal acht Nutzungskonflikte bei langen Fahrten toleriert.   |
| <b>Kraftwerkspark</b>                             | aus Kraftwerksinvestitionsmodell ELIAS  |

<sup>a</sup> Für die Akzeptanzanalyse wurde ein elektrischer Fahranteil von 67 % angenommen.

Tabelle (Anhang) 2: Annahmen zu Anschaffungskosten elektrischer Fahrzeuge

| Größenklasse         | 2020     |                  | 2030     |                  |
|----------------------|----------|------------------|----------|------------------|
|                      | PHEV     | BEV <sup>a</sup> | PHEV     | BEV <sup>a</sup> |
| Mini                 | 13.525 € | 14.100 €         | 12.925 € | 13.075 €         |
| Kleinwagen           | 18.175 € | 22.190 €         | 17.490 € | 20.260 €         |
| mittel               | 27.700 € | 32.070 €         | 26.880 € | 29.800 €         |
| groß I <sup>b</sup>  | 40.640 € | -                | 39.670 € | -                |
| groß II <sup>b</sup> | 50.640 € | -                | 49.670 € | -                |

<sup>a</sup> Die Angaben in der Größenklasse „Mini“ beziehen sich auf City-BEV.

<sup>b</sup> In der Größenklasse groß wurde in der Akzeptanzanalyse für die Eigenschaft Anschaffungspreis zwischen groß I (Mittelklasse und Geländewagen) und groß II (Obere Mittelklasse) unterschieden.

Tabelle (Anhang) 3: Annahmen zu Anschaffungskosten konventioneller Otto-Fahrzeuge

| Größenklasse         | Otto     | Otto     |
|----------------------|----------|----------|
| Mini                 | 10.900 € | 11.500 € |
| Kleinwagen           | 15.250 € | 16.100 € |
| mittel               | 24.400 € | 25.300 € |
| groß I <sup>a</sup>  | 35.200 € | 36.430 € |
| groß II <sup>a</sup> | 45.200 € | 46.430 € |

<sup>a</sup> In der Größenklasse groß wurde in der Akzeptanzanalyse für die Eigenschaft Anschaffungspreis zwischen groß I (Mittelklasse und Geländewagen) und groß II (Obere Mittelklasse) unterschieden.

Tabelle (Anhang) 4: Annahmen zu dem nominellen elektrischen Energieverbrauch von elektrischen Fahrzeugen

| Größenklasse | Energieverbrauch [kWh/km] 2020 |      |          | Energieverbrauch [kWh/km] 2030 |      |          |
|--------------|--------------------------------|------|----------|--------------------------------|------|----------|
|              | PHEV                           | BEV  | City-BEV | PHEV                           | BEV  | City-BEV |
| Mini         | 0,13                           | 0,12 | 0,11     | 0,12                           | 0,11 | 0,10     |
| Kleinwagen   | 0,15                           | 0,14 | -        | 0,14                           | 0,13 | -        |
| kompakt      | 0,18                           | 0,17 | -        | 0,17                           | 0,16 | -        |
| groß         | 0,21                           | -    | -        | 0,20                           | -    | -        |

Tabelle (Anhang) 5 Annahmen zu Kraftstoffverbrauch (real) und CO<sub>2</sub>-Intensität (NEFZ) konventioneller Fahrzeuge

| Größenklasse | Jahr | Otto        |                             | Diesel      |                             |
|--------------|------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
|              |      | Verbrauch   | CO <sub>2</sub> -Emissionen | Verbrauch   | CO <sub>2</sub> -Emissionen |
| Mini         | 2020 | 4,1 l/100km | 95 g/km                     | 2,7 l/100km | 71 g/km                     |
| Kleinwagen   | 2020 | 4,4 l/100km | 102 g/km                    | 2,9 l/100km | 77 g/km                     |
| mittel       | 2020 | 5,4 l/100km | 126 g/km                    | 3,9 l/100km | 103 g/km                    |
| groß         | 2030 | 3,6 l/100km | 84 g/km                     | 2,3 l/100km | 61 g/km                     |
| Mini         | 2030 | 3,9 l/100km | 91 g/km                     | 2,5 l/100km | 66 g/km                     |
| Kleinwagen   | 2030 | 4,7 l/100km | 109 g/km                    | 3,4 l/100km | 90 g/km                     |
| mittel       | 2020 | 4,1 l/100km | 95 g/km                     | 2,7 l/100km | 71 g/km                     |
| groß         | 2020 | 4,4 l/100km | 102 g/km                    | 2,9 l/100km | 77 g/km                     |

## Anhang B: Fahrzeugnutzungsprofile

Tabelle (Anhang) 6: Fahrzeugnutzungsprofile privat zugelassener Pkw

| Tag     | Profil | Einteilungskriterien |                                      |                            |                        | Eigenschaften      |                        |                        |                                     |               |                        |
|---------|--------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------|------------------------|
|         |        | Anzahl Fahrten       | Zweck <sup>a</sup>                   | Startzeit der ersten Fahrt | Tagesfahrleistung [km] | Anteil pro Tag [%] | Tagesfahrleistung [km] | Start der ersten Fahrt | Längste Standzeit während des Tages |               | Ende der letzten Fahrt |
|         |        |                      |                                      |                            |                        |                    |                        |                        | Uhrzeit                             | Standort      |                        |
| Werktag | 1_0    | 0                    | -                                    | -                          | -                      | 38                 | 0                      | -                      | -                                   | -             | -                      |
| Werktag | 1_1    | -                    | -                                    | 0 – 12 h                   | > 37,5                 | 19                 | 76                     | 07:36                  | 08:50 – 16:03                       | Arbeitsstelle | 18:22                  |
| Werktag | 1_2    | -                    | mindestens 1x A                      | 0 – 12 h                   | < 37,5                 | 18                 | 19                     | 07:36                  | 08:20 – 16:16                       | Arbeitsstelle | 17:44                  |
| Werktag | 1_3    | -                    | 0 x A                                | 0 – 12 h                   | < 37,5                 | 16                 | 16                     | 09:11                  | 10:06 – 13:38                       | Einkaufsort   | 14:52                  |
| Werktag | 1_4    | -                    | -                                    | 12 – 24 h                  | -                      | 9                  | 21                     | 15:38                  | 16:09 – 18:00                       | Freizeitort   | 18:31                  |
| Samstag | 2_0    | 0                    | -                                    | -                          | -                      | 47                 | 0                      | -                      | -                                   | -             | -                      |
| Samstag | 2_1    | 2 – 3                | 0 x A                                | 0 – 12 h                   | < 37,5                 | 15                 | 12                     | 09:55                  | 10:17 – 12:13                       | Einkaufsort   | 12:38                  |
| Samstag | 2_2    | -                    | -                                    | 12 – 24 h                  | -                      | 14                 | 25                     | 15:00                  | 15:33 – 17:37                       | Freizeitort   | 18:11                  |
| Samstag | 2_3    | -                    | mindestens 1x A & 0x A (> 3 Fahrten) | 0 – 12 h                   | < 37,5                 | 13                 | 18                     | 09:23                  | 10:40 – 15:27                       | zu Hause      | 16:52                  |
| Samstag | 2_4    | -                    | -                                    | 0 – 12 h                   | > 37,5                 | 11                 | 80                     | 08:38                  | 10:53 – 16:13                       | Freizeitort   | 18:41                  |
| Sonntag | 3_0    | 0                    | -                                    | -                          | -                      | 66                 | 0                      | -                      | -                                   | -             | -                      |
| Sonntag | 3_1    | -                    | -                                    | 12 – 24 h                  | -                      | 14                 | 29                     | 14:58                  | 15:34 – 18:08                       | Freizeitort   | 18:42                  |
| Sonntag | 3_2    | -                    | -                                    | 0 – 12 h                   | < 37,5                 | 14                 | 16                     | 09:47                  | 10:37 – 14:20                       | Freizeitort   | 15:12                  |
| Sonntag | 3_3    | -                    | -                                    | 0 – 12 h                   | > 37,5                 | 6                  | 93                     | 09:27                  | 11:01 – 15:45                       | Freizeitort   | 17:36                  |

<sup>a</sup> Das Kürzel A entspricht Arbeitsstelle

## Anhang C: Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen, CO<sub>2</sub>-Emissionen, CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren und Anteil erneuerbarer Energien

Tabelle (Anhang) 7: Brennstoffmix der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2020 (für Läufe nur mit Elektromobilität und mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus Wind onshore)

| Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen 2020 in MWh |                |                |                  |                  |                   |                  |                   |                  |
|---|----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|   | ohne LM 1      | mit LM 1       | ohne LM 2        | mit LM 2         | ohne LM 1<br>Wind | mit LM 1<br>Wind | ohne LM 2<br>Wind | mit LM 2<br>Wind |
| <b>Braunkohle</b>                                     | 212.864        | 383.156        | 289.266          | 477.261          | -221.862          | -52.853          | -257.706          | -76.068          |
| <b>Steinkohle</b>                                     | 586.826        | 366.499        | 713.160          | 457.127          | 248.525           | 25.313           | 286.309           | 29.348           |
| <b>Erdgas</b>   | 78.451         | 11.233         | 90.461           | 18.599           | 65.882            | 718              | 73.745            | 5.304            |
| <b>Kernenergie</b>                                    | 12.894         | 49.120         | 17.553           | 51.427           | -41.453           | -8.389           | -50.892           | -21.884          |
| <b>Heizöl leicht</b>                                  | 7.906          | 0              | 6.459            | 0                | 7.618             | -103             | 6.142             | -129             |
| <b>Heizöl schwer</b>                                  | 8.744          | -28            | 8.964            | 785              | 7.863             | -436             | 8.129             | 242              |
| <b>Biogas</b>   | 239            | 2.911          | 1.393            | 3.626            | -2.828            | -2.206           | -2.382            | -2.709           |
| <b>feste Biomasse</b>                                 | 0              | 0              | 121              | 0                | -4.608            | -341             | -4.504            | -563             |
| <b>Pflanzenöl</b>                                     | 258            | 2.018          | 1.459            | 2.018            | -524              | 1.086            | -455              | 1.058            |
| <b>Laufwasser</b>                                     | 0              | 0              | 0                | 0                | 0                 | 0                | 0                 | 0                |
| <b>Wind onshore</b>                                   | 540            | 6.382          | 2.053            | 15.461           | 862.442           | 868.493          | 1.088.639         | 1.102.894        |
| <b>Wind offshore</b>                                  | 1.901          | 6.708          | 4.360            | 14.235           | -5.723            | 1.411            | -5.761            | 7.390            |
| <b>PV</b>   | 0              | 0              | 0                | 0                | 0                 | 0                | 0                 | 0                |
| <b>Import</b>   | 0              | 0              | 0                | 0                | 0                 | 0                | 0                 | 0                |
| <b>Summe</b>  | <b>910.622</b> | <b>827.998</b> | <b>1.135.249</b> | <b>1.040.538</b> | <b>915.332</b>    | <b>832.693</b>   | <b>1.141.264</b>  | <b>1.044.883</b> |
| <b>Turbinenstrom</b>                                  | 132.887        | -104.587       | 127.380          | -147.704         | 147.541           | -89.976          | 146.099           | -134.182         |

Tabelle (Anhang) 8: Emissionsfaktor und Anteil erneuerbarer Energien der Differenzstromerzeugung sowie nicht nutzbare fluktuierende erneuerbare Energien bezogen auf das maximal verfügbare Dargebot für 2020 (für Läufe nur mit Elektromobilität und mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus Wind onshore)

|   | ohne LM 1 | mit LM 1 | ohne LM 2 | mit LM 2 | ohne LM 1<br>Wind | mit LM 1<br>Wind | ohne LM 2<br>Wind | mit LM 2<br>Wind |
|---|-----------|----------|-----------|----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (t)</b>                        | 811.792   | 738.687  | 1.014.765 | 923.863  | 55.161            | -21.883          | 61.748            | -36.592          |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor (kg/kWh<sub>el</sub>)</b> | 0,891     | 0,892    | 0,894     | 0,888    | 0,060             | -0,026           | 0,054             | -0,035           |
| <b>Anteil erneuerbarer Energien</b>                         | 0%        | 2%       | 1%        | 3%       | 93%               | 104%             | 94%               | 106%             |
| <b>Überschuss Wind und PV bez. auf Dargebot</b>             | 0,1%      | 0,1%     | 0,1%      | 0,1%     | 0,2%              | 0,1%             | 0,2%              | 0,1%             |

Tabelle (Anhang) 9: Brennstoffmix der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2020 (für Läufe mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus PV bzw. Biogas)

| Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen 2020 in MWh |                 |                |                  |                  |                     |                    |                     |                    |
|---|-----------------|----------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|   | ohne LM 1<br>PV | mit LM 1<br>PV | ohne LM 2<br>PV  | mit LM 2<br>PV   | ohne LM 1<br>Biogas | mit LM 1<br>Biogas | ohne LM 2<br>Biogas | mit LM 2<br>Biogas |
| <b>Braunkohle</b>                                     | -93.611         | 84.719         | -95.665          | 91.591           | -63.748             | 104.084            | -59.396             | 121.968            |
| <b>Steinkohle</b>                                     | 107.485         | -120.359       | 109.495          | -151.126         | 52.558              | -170.757           | 43.517              | -216.532           |
| <b>Erdgas</b>   | 55.254          | -11.116        | 58.455           | -9.152           | 36.789              | -28.386            | 35.509              | -30.872            |
| <b>Kernenergie</b>                                    | -6.301          | 29.074         | -6.677           | 25.243           | -7.581              | 27.460             | -8.205              | 23.978             |
| <b>Heizöl leicht</b>                                  | 7.906           | 0              | 6.458            | 0                | 6.166               | -705               | 4.413               | -886               |
| <b>Heizöl schwer</b>                                  | 7.542           | -644           | 8.067            | -141             | 5.007               | -2.710             | 4.822               | -2.649             |
| <b>Biogas</b>   | -660            | 1.918          | 261              | 2.374            | 878.503             | 881.175            | 1.106.184           | 1.108.463          |
| <b>feste Biomasse</b>                                 | -801            | 0              | 2                | 0                | -2.675              | -1.578             | -2.339              | -1.992             |
| <b>Pflanzenöl</b>                                     | -285            | 2.016          | -218             | 2.016            | -497                | 1.803              | -398                | 1.749              |
| <b>Laufwasser</b>                                     | 0               | 0              | 0                | 0                | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Wind onshore</b>                                   | -7.253          | -1.081         | -7.956           | 6.992            | 540                 | 6.382              | 2.053               | 15.461             |
| <b>Wind offshore</b>                                  | -4.964          | 131            | -4.076           | 6.165            | 1.901               | 6.708              | 4.360               | 14.235             |
| <b>PV</b>   | 867.919         | 867.919        | 1.094.315        | 1.094.315        | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Import</b>   | 0               | 0              | 0                | 0                | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Summe</b>  | <b>932.229</b>  | <b>852.576</b> | <b>1.162.461</b> | <b>1.068.277</b> | <b>906.962</b>      | <b>823.476</b>     | <b>1.130.520</b>    | <b>1.032.923</b>   |
| <b>Turbinenstrom</b>                                  | 200.124         | -28.102        | 212.061          | -61.385          | 121.495             | -118.657           | 112.664             | -171.401           |

Tabelle (Anhang) 10: Emissionsfaktor und Anteil erneuerbarer Energien der Differenzstromerzeugung sowie nicht nutzbare fluktuierende erneuerbare Energien bezogen auf das maximal verfügbare Dargebot für 2020 (für Läufe mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus PV bzw. Biogas)

|   | ohne LM 1<br>PV | mit LM 1<br>PV | ohne LM 2<br>PV | mit LM 2<br>PV | ohne LM 1<br>Biogas | mit LM 1<br>Biogas | ohne LM 2<br>Biogas | mit LM 2<br>Biogas |
|---|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (t)</b>                        | 106.328         | 35.121         | 127.358         | 30.354         | 162.153             | 84.368             | 198.337             | 98.840             |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor (kg/kWh<sub>el</sub>)</b> | 0,114           | 0,041          | 0,110           | 0,028          | 0,179               | 0,102              | 0,175               | 0,096              |
| <b>Anteil erneuerbarer Energien</b>                         | 92%             | 102%           | 93%             | 104%           | 97%                 | 109%               | 98%                 | 110%               |
| <b>Überschuss Wind und PV bez. auf Dargebot</b>             | 0,2%            | 0,1%           | 0,2%            | 0,1%           | 0,1%                | 0,1%               | 0,1%                | 0,1%               |

Tabelle (Anhang) 11: Brennstoffmix der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2030 (für Läufe nur mit Elektromobilität und mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus Wind onshore)

| Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen 2030 in MWh |                  |                  |                   |                   |                   |                  |                   |                   |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|   | ohne LM 1        | mit LM 1         | ohne LM 2         | mit LM 2          | ohne LM 1<br>Wind | mit LM 1<br>Wind | ohne LM 2<br>Wind | mit LM 2<br>Wind  |
| <b>Braunkohle</b>                                     | 1.681.462        | 3.382.049        | 2.324.255         | 4.279.193         | -2.059.293        | -461.302         | -2.294.389        | -552.954          |
| <b>Steinkohle</b>                                     | 3.539.785        | 2.857.136        | 4.885.265         | 3.573.746         | 1.096.898         | 323.626          | 1.824.160         | 396.904           |
| <b>Erdgas</b>   | 1.996.894        | 514.999          | 2.188.381         | 546.169           | 1.692.888         | 224.732          | 1.773.376         | 176.665           |
| <b>Kernenergie</b>                                    | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                | 0                 | 0                 |
| <b>Heizöl leicht</b>                                  | 419.722          | 51.422           | 431.728           | 83.549            | 361.597           | 12.164           | 359.208           | 32.010            |
| <b>Heizöl schwer</b>                                  | 298.910          | 60.396           | 323.671           | 78.107            | 266.258           | 30.228           | 277.544           | 35.802            |
| <b>Biogas</b>   | -2.256           | -627             | -817              | -507              | -3.178            | -45              | -1.860            | 0                 |
| <b>feste Biomasse</b>                                 | 678              | 29.905           | 7.992             | 32.677            | -60.950           | -28.940          | -61.164           | -31.871           |
| <b>Pflanzenöl</b>                                     | 641              | 3.722            | 1.530             | 4.232             | -10.396           | -5.941           | -11.788           | -7.895            |
| <b>Laufwasser</b>                                     | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                | 0                 | 0                 |
| <b>Wind onshore</b>                                   | 22.388           | 232.766          | 40.811            | 279.281           | 8.673.675         | 8.936.887        | 10.870.474        | 11.226.062        |
| <b>Wind offshore</b>                                  | 300.629          | 1.379.633        | 497.427           | 1.674.402         | -1.643.227        | -487.226         | -1.956.324        | -636.506          |
| <b>PV</b>   | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                 | 0                | 0                 | 0                 |
| <b>Import</b>   | 931.267          | 65.125           | 876.216           | 103.503           | 855.319           | 30.812           | 780.640           | 54.148            |
| <b>Summe</b>  | <b>9.190.120</b> | <b>8.576.527</b> | <b>11.576.458</b> | <b>10.654.352</b> | <b>9.169.592</b>  | <b>8.574.995</b> | <b>11.559.876</b> | <b>10.692.365</b> |
| <b>Turbinenstrom</b>                                  | 1.020.780        | -683.265         | 1.494.291         | -1.169.796        | 956.899           | -688.030         | 1.442.690         | -1.051.504        |

Quelle: PowerFlex

Tabelle (Anhang) 12: Emissionsfaktor und Anteil erneuerbarer Energien der Differenzstromerzeugung sowie nicht nutzbare fluktuierende erneuerbare Energien bezogen auf das maximal verfügbare Dargebot für 2030 (für Läufe nur mit Elektromobilität und mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus Wind onshore)

|   | ohne LM 1 | mit LM 1  | ohne LM 2 | mit LM 2  | ohne LM 1<br>Wind | mit LM 1<br>Wind | ohne LM 2<br>Wind | mit LM 2<br>Wind |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (t)</b>                        | 6.276.080 | 6.404.909 | 8.249.818 | 8.012.349 | 214.425           | 175.968          | 716.155           | 182.056          |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor (kg/kWh<sub>el</sub>)</b> | 0,683     | 0,747     | 0,713     | 0,752     | 0,023             | 0,021            | 0,062             | 0,017            |
| <b>Anteil erneuerbarer Energien</b>                         | 4%        | 19%       | 5%        | 19%       | 76%               | 98%              | 76%               | 99%              |
| <b>Überschuss Wind und PV bez. auf Dargebot</b>             | 2,4%      | 1,8%      | 2,3%      | 1,6%      | 3,2%              | 2,6%             | 3,3%              | 2,6%             |

Tabelle (Anhang) 13: Brennstoffmix der Differenz der Stromerzeugung zwischen Läufen mit Elektromobilität und Basislauf für 2030 (für Läufe mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus PV bzw. Biogas)

| Differenzstromerzeugung nach Brennstoffen 2030 in MWh |                  |                  |                   |                   |                     |                    |                     |                    |
|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|   | ohne LM 1<br>PV  | mit LM 1<br>PV   | ohne LM 2<br>PV   | mit LM 2<br>PV    | ohne LM 1<br>Biogas | mit LM 1<br>Biogas | ohne LM 2<br>Biogas | mit LM 2<br>Biogas |
| <b>Braunkohle</b>                                     | -1.488.525       | 103.213          | -1.605.839        | 210.314           | -1.573.137          | 147.493            | -1.666.431          | 222.770            |
| <b>Steinkohle</b>                                     | -122.412         | -905.986         | 349.048           | -1.183.355        | -478.408            | -1.321.309         | -114.049            | -1.621.381         |
| <b>Erdgas</b>   | 1.623.898        | 150.270          | 1.641.393         | -13.693           | 1.231.986           | -279.553           | 1.156.905           | -452.493           |
| <b>Kernenergie</b>                                    | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Heizöl leicht</b>                                  | 329.711          | -10.968          | 316.999           | -14.275           | 248.678             | -76.570            | 216.044             | -98.079            |
| <b>Heizöl schwer</b>                                  | 245.796          | 4.438            | 246.697           | 10.030            | 206.266             | -34.169            | 193.399             | -37.934            |
| <b>Biogas</b>   | -5.088           | -995             | -3.860            | -45               | 8.845.459           | 8.850.779          | 11.071.996          | 11.078.759         |
| <b>feste Biomasse</b>                                 | -42.384          | 8.341            | -41.218           | 4.084             | -278.069            | -206.299           | -362.244            | -270.624           |
| <b>Pflanzenöl</b>                                     | -4.439           | 1.224            | -4.739            | 729               | -32.112             | -22.282            | -35.133             | -25.602            |
| <b>Laufwasser</b>                                     | 0                | 0                | 0                 | 0                 | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Wind onshore</b>                                   | -249.854         | 39.888           | -302.166          | 84.192            | 20.109              | 231.516            | 38.855              | 279.281            |
| <b>Wind offshore</b>                                  | -643.815         | 546.774          | -695.163          | 710.279           | 281.232             | 1.366.478          | 478.163             | 1.656.964          |
| <b>PV</b>   | 8.862.090        | 8.862.090        | 11.095.420        | 11.096.263        | 0                   | 0                  | 0                   | 0                  |
| <b>Import</b>   | 835.220          | 4.626            | 748.105           | 16.622            | 689.692             | -96.097            | 573.728             | -97.223            |
| <b>Summe</b>  | <b>9.340.196</b> | <b>8.802.915</b> | <b>11.744.676</b> | <b>10.921.144</b> | <b>9.161.697</b>    | <b>8.559.988</b>   | <b>11.551.234</b>   | <b>10.634.439</b>  |
| <b>Turbinenstrom</b>                                  | 1.487.793        | 21.220           | 2.017.759         | -339.580          | 932.331             | -734.730           | 1.415.796           | -1.231.762         |

Quelle: PowerFlex

Tabelle (Anhang) 14: Emissionsfaktor und Anteil erneuerbarer Energien der Differenzstromerzeugung sowie nicht nutzbare fluktuierende erneuerbare Energien bezogen auf das maximal verfügbare Dargebot für 2030 (für Läufe mit Elektromobilität und zusätzlicher Stromerzeugung aus PV bzw. Biogas)

|   | ohne LM 1<br>PV | mit LM 1<br>PV | ohne LM 2<br>PV | mit LM 2<br>PV | ohne LM 1<br>Biogas | mit LM 1<br>Biogas | ohne LM 2<br>Biogas | mit LM 2<br>Biogas |
|---|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (t)</b>                        | 31.637          | -45.224        | 490.544         | -130.205       | 361.510             | 389.227            | 925.249             | 483.959            |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor (kg/kWh<sub>el</sub>)</b> | 0,003           | -0,005         | 0,042           | -0,012         | 0,039               | 0,045              | 0,080               | 0,046              |
| <b>Anteil erneuerbarer Energien</b>                         | 85%             | 107%           | 86%             | 109%           | 96%                 | 119%               | 97%                 | 120%               |
| <b>Überschuss Wind und PV bez. auf Dargebot</b>             | 2,8%            | 2,2%           | 2,8%            | 2,1%           | 2,4%                | 1,8%               | 2,3%                | 1,7%               |