

POWER-TO-GAS ALS ERNEUERBARER KRAFTSTOFF IM VERKEHRSEKTOR

Teilabschlussbericht

WOMBAT – Wirkungsgrad-Optimierung von
Methanisierungs- und Biogasanlagen-Technologie im
Rahmen eines EE-Speicherungs-Pilotprojekts

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Bundestages unter dem Förderkennzeichen 0325428E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Autoren:	Tobias Trost und Dr. Mareike Jentsch
Auftraggeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Projektlaufzeit:	01.07.2012 bis 30.09.2016
Projektpartner:	Audi AG ETOGAS GmbH Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) EWE ERNEUERBARE ENERGIEN GmbH (EWE)

Ansprechpartner:

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES
Bereich Energiewirtschaft und Netzbetrieb

Königstor 59
34119 Kassel

Kontakt:
Tobias Trost
+49 (0) 561 7294-443
tobias.trost@iwes.fraunhofer.de

Um die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, muss der Ausstoß an Treibhausgasemissionen sektorenübergreifend nahezu vollständig reduziert werden. Zur Zielerreichung steht hierbei neben den Bereichen Strom und Wärme insbesondere der Verkehrssektor, dessen Endenergiebedarf heute überwiegend durch fossile Energieträger geprägt ist, vor großen Herausforderungen.

Vor dem beschriebenen Hintergrund der notwendigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors umfasst dieser Bericht modellgestützte Analysen zur zukünftigen Marktanteilsentwicklung alternativer Antriebskonzepte und erneuerbarer Kraftstoffe im motorisierten Individualverkehr (MIV) in Deutschland. Hierbei liegt der Untersuchungsfokus auf der Power-to-Gas (PtG) Technologie zur Bereitstellung von gasförmigen Kraftstoffen sowie den verschiedenen Antriebskonzepten der Elektromobilität.

Aufbauend auf den Simulationsergebnissen der Marktdiffusion in der Automobilwirtschaft ist die Bewertung der systemanalytischen Einbindung der PtG-Technologie, als erneuerbare Kraftstoff- und Langzeitspeicheroption, sowie der Elektromobilität in das deutschlandweite und europäische Energieversorgungssystem ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt. Die Untersuchungen erfolgen hierbei mit Hilfe des Fundamentallmodells zur Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung des Fraunhofer IWES für das Jahr 2050. Zusätzlich werden Analysen möglicher PtG-Anlagenstandorte in Deutschland mit einer Fokussierung auf das EWE-Netzgebiet durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse zur Entwicklung des Fahrzeugbestands im MIV zeigen, dass generell eine stärkere Diversifizierung der Antriebskonzepte und Energieträgerbasis zu erwarten ist. Bei zukünftig sinkenden Batteriekosten und zunehmender Überwindung der Reichweitenbegrenzung können sich neben Hybridkonzepten mit Möglichkeit der externen Batterieladung insbesondere rein batterieelektrische Fahrzeuge durchsetzen. Neben einem Markthochlauf der Elektromobilität ist die kurz- bis mittelfristige Entwicklung des Fahrzeugbestands durch Erdgasfahrzeuge geprägt, die bei Erreichung der Wettbewerbsfähigkeit von PtG langfristig zu gewissen Teilen durch erneuerbares Methan und Wasserstoff als erneuerbare Kraftstoffoptionen abgelöst werden. Darüber hinaus bietet eine CO₂-Besteuerung von Kraftstoffen ein Instrument zur Internalisierung negativer externer Umwelteffekte und sorgt insgesamt für eine Reduktion des Endenergiebedarfs und damit verbundenen CO₂-Emissionen.

Die zentralen Ergebnisse der Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung zeigen zukünftig eine verstärkte Sektorenkopplung und damit verbunden einen deutlichen Anstieg der Nettostromerzeugung. Diese wird unter anderem zur Deckung des zusätzlichen direkten und indirekten Strombedarfs für die Elektromobilität sowie für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mit Hilfe der PtG-Technologie genutzt. Zusätzlich erfolgt europaweit in Ländern mit vorteilhaften Standortfaktoren für die Windenergie ein darüber hinausgehender PtG-Ausbau als saisonale Speicheroption und zur Substitution von Erdgas in den anderen Sektoren.

Die durchgeführten Analysen einer systemdienlichen regionalen Verteilung von PtG-Anlagen in Deutschland machen deutlich, dass insbesondere das Netzgebiet der EWE aufgrund zukünftig hoher zu erwartender Ausbauleistungen erneuerbarer Energien, verfügbarer Gasspeicherkapazitäten sowie nennenswerter Potenziale an biogenen CO₂-Quellen für einen PtG-Ausbau besonders geeignet erscheint.

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
1 Einleitung.....	5
2 Modelle und Datengrundlage.....	7
2.1 Technologiedatenbank.....	8
2.1.1 Technische Parameter	9
2.1.2 Ökonomische Kenngrößen.....	10
2.2 Fahrzeugbestandsmodell.....	13
2.3 Einsatz- und Ausbauoptimierung	14
3 Ergebnisse der Fahrzeugbestandsentwicklung	16
3.1 Basisszenario	16
3.2 Sensitivitätsanalyse	20
4 Ergebnisse der Sektorenkopplung Strom-Verkehr	23
4.1 Basisszenario	24
4.2 Sensitivitätsanalyse	26
4.3 Power-to-Gas Anlagenstandorte	27
5 Schlussfolgerungen	31
6 Literaturverzeichnis	33

Hintergrund

In diesem Bericht werden Teilergebnisse aus dem Verbundvorhaben „WOMBAT – Wirkungsgrad-Optimierung von Methanisierungs- und Biogasanlagen-Technologie im Rahmen eines EE-Speichnungs-Pilotprojekts“ des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES vorgestellt (Förderkennzeichen 0325428E). Die weiteren Projekthinhalte des Fraunhofer IWES sind im Abschlussbericht (IWES 2016) dokumentiert. Für die Förderung des Gesamtprojekts danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi.

Der Teilabschlussbericht umfasst die Simulationsergebnisse der zukünftigen Marktanteilsentwicklungen und Potenziale alternativer Antriebskonzepte und erneuerbarer Kraftstoffe im motorisierten Individualverkehr (MIV).¹ Hierbei liegt der Fokus auf den unterschiedlichen elektrischen Antriebskonzepten sowie der Power-to-Gas (PtG) Technologie zur Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen Kraftstoffen. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen der Marktdiffusion ist die Bewertung der energiewirtschaftlichen und systemanalytischen Einbindung der PtG-Technologie, als Langzeitspeicher- und erneuerbare Kraftstoffoption, sowie der Elektromobilität in das zukünftige deutschlandweite und europäische Energieversorgungssystem ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt des Teilberichts. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung möglicher PtG-Anlagenstandorte in Deutschland.

Motivation

Die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre erreichten 2015, u. a. durch eine anhaltende anthropogene Anreicherung, den Höchstwert seit Beginn der Messungen und gleichzeitig war es das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen (siehe hierzu u. a. (Blunden, Arndt 2016)). Vor diesem Hintergrund hat sich die Staatengemeinschaft 2015 auf der UN-Klimakonferenz in Paris darauf geeinigt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu beschränken (UNFCCC 2015). Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen hat sich die Bundesregierung im Energiekonzept 2010 bereits das langfristige Ziel gesetzt, die Emissionen bis 2050 um mindestens 80% gegenüber 1990 zu senken (BMWi und BMU 2010).

Im Fokus der Umsetzung und Berichterstattung steht heute insbesondere die Energiewende im Stromsektor. So betrug der Anteil der erneuerbaren Energien (EE) am Bruttostromverbrauch 2015 bereits über 30% (AGEB 2016). Aber auch der Wärme- und insbesondere der Verkehrssektor müssen im Zuge der Energiewende einen Systemwandel vollziehen, um einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Im Gegensatz zum Stromsektor betrug der Anteil erneuerbaren Energien 2015 lediglich 5,2% am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (BMWi 2016). Hieraus wird deutlich, dass der Verkehrssektor zukünftig einen deutlichen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten muss.

¹ Unter dem Begriff des motorisierten Individualverkehrs wird die individuelle Nutzung von Personenkraftwagen (Pkw) und motorisierten Zweirädern zusammengefasst, wobei sich der Fokus dieser Untersuchung vorrangig auf Pkw beschränkt.

Vor diesem Hintergrund ist in Abbildung 1-1 die historische Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors in Deutschland von 1990 bis heute differenziert nach Energieträgern dargestellt. Dieser liegt heute bei 2620 PJ (730 TWh), was einem Anteil von etwa 30% am gesamten Endenergiebedarf in Deutschland entspricht (AGEB 2016). Zusätzlich sind die wesentlichen mittel- bis langfristigen sektorenspezifischen Ziele zur Senkung des Endenergiebedarfs sowie zur Reduktion der Treibhausgase mit angegeben.

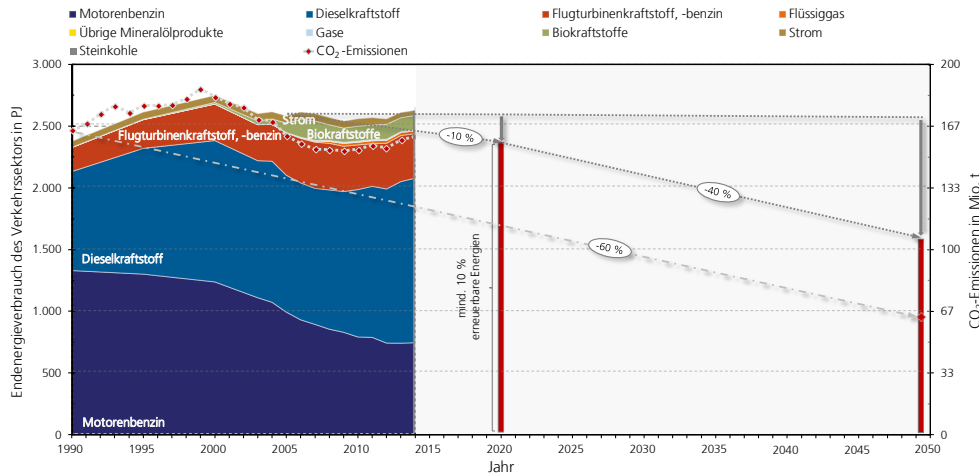


Abbildung 1-1:
Endenergiebedarf und CO₂-
Emissionen des Verkehrssektors
in Deutschland

Daten basieren i. W. auf (BMW und
BMU 2010; AGEB 2016)

Heute entfallen etwa 57% des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors und damit verbundenen Treibhausgasemissionen auf den motorisierten Individualverkehr (Dena 2012), der weitüberwiegend durch die mineralölbasierten Kraftstoffe Benzin und Diesel geprägt ist. Daher stellt der MIV den Schwerpunkt der Analysen dar. Im MIV bestehen zudem eine Vielzahl technischer Optionen und ein entsprechend großer zukünftiger Gestaltungsspielraum, um den Ausstoß an Treibhausgasemissionen langfristig signifikant zu reduzieren.

Vor dem beschriebenen Hintergrund der erforderlichen Verkehrswende liegt der Untersuchungsfokus dieses Teilberichts auf den folgenden beiden Schwerpunkten:

- Analyse der zukünftigen Marktanteilsentwicklungen und Potenziale alternativer Antriebskonzepte und erneuerbarer Kraftstoffe im motorisierten Individualverkehr anhand eines Fahrzeugbestandsmodells. Hierbei liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf den unterschiedlichen elektrischen Antriebskonzepten sowie der Power-to-Gas Technologie zur Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen Kraftstoffen.
- Aufbauend auf den Erkenntnissen des zukünftigen Automobilmarktes ist die Bewertung der langfristigen Kopplung des Strom- und Verkehrssektors ein weiteres Untersuchungsziel. Unter Anwendung der Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung des Fraunhofer IWES sollen die Auswirkungen des zusätzlichen mobilitätsbedingten Strombedarfs auf die deutsche und europäische Energieversorgungsstruktur im Detail für das Jahr 2050 analysiert und diskutiert werden.

2 Modelle und Datengrundlage

Zur Beschreibung der methodischen Vorgehensweise zur Analyse der in Abschnitt 1 beschriebenen Untersuchungsschwerpunkte ist in Abbildung 2-1 der methodische Ablauf sowie die genutzte Modellkette vereinfacht abgebildet.

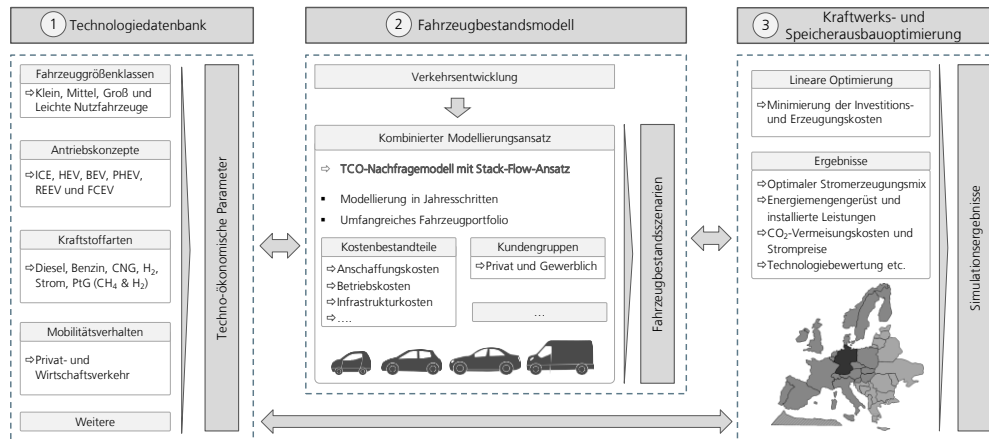


Abbildung 2-1:
Methodischer Ablauf der
Simulationen und Modellkette

Für die detaillierte Bewertung der zukünftigen energiewirtschaftlichen und systemanalytischen Rolle der Elektromobilität sowie der Power-to-Gas Technologie als erneuerbare Kraftstoffoption im motorisierten Individualverkehr bedarf es zu Beginn der Analysen einer entsprechend umfassenden Technologiedatenbasis, u. a. zur Beschreibung der unterschiedlichen Antriebskonzepte. Die wesentlichen hierbei unterstellten technischen Parameter und ökologischen Kenngrößen der berücksichtigten Fahrzeugantriebe werden daher in Abschnitt 2.1 vorgestellt.

Für die anschließende modellgestützte Analyse der zukünftigen Marktdiffusion verschiedener Antriebskonzepte im motorisierten Individualverkehr bis zum Jahr 2050 wird in einem zweiten Schritt ein Fahrzeugbestandsmodell genutzt. Dieses ermöglicht es, die dynamischen Entwicklungen des deutschlandweiten Fahrzeugbestands in Jahresschritten unter Berücksichtigung von gasförmigen Stromkraftstoffen sowie Vielfältiger elektrischer Antriebskonzepte abzubilden (siehe hierzu Abschnitt 2.2).

Zur Bewertung der Auswirkungen des in Schritt zwei ermittelten zukünftig steigenden mobilitätsbedingten Strombedarfs auf die deutschlandweite und europäische Energieversorgungsstruktur wird die Kraftwerks- und Speicherausbauroptimierung SCOPE des Fraunhofer IWES verwendet, dessen wesentlicher Modellaufbau sowie zentrale Annahmen in Abschnitt 2.3 beschrieben werden.

Abschließend werden die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Szenarioanalyse vorgestellt. In Kapitel 3 erfolgt hierzu eine Beschreibung der zukünftigen Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte und Kraftstoffe für das analysierte Basisszenario sowie weiterer Szenariovarianten. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen des ermittelten steigenden mobilitätsbedingten Strombedarfs auf die deutschlandweite und europäische Energieversorgungsstruktur in Kapitel 4 beschrieben. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung möglicher PtG-Anlagenstandorte in Deutschland insbesondere in Bezug auf das EWE-Netzgebiet.

2.1 Technologiedatenbank

Fahrzeugantriebe

Die für die Analysen verwendete umfassende Technologiedatenbasis berücksichtigt wesentliche ökonomische und ökologische Parameter heute diskutierter Antriebskonzepte. Prinzipiell kann hierbei zwischen thermischen und elektrischen Fahrzeugantrieben sowie Antriebskombinationen unterschieden werden (siehe hierzu vereinfachte Abbildung 2-2).

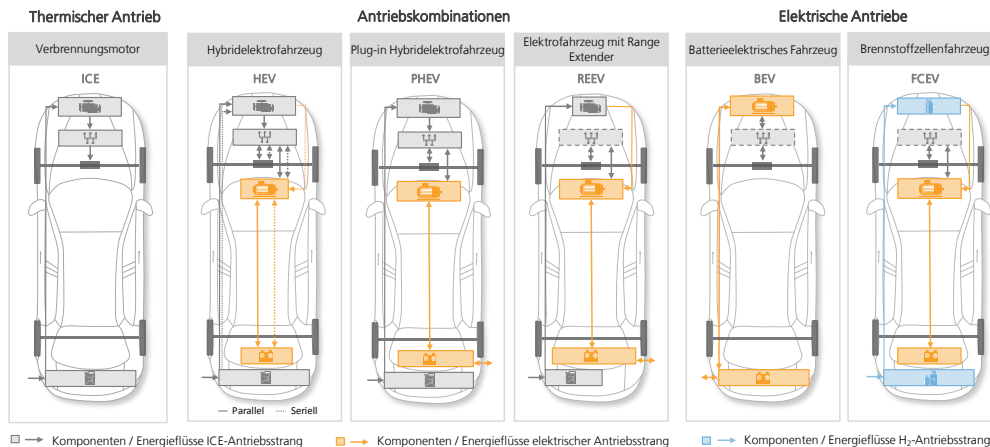


Abbildung 2-2:
Fahrzeugantriebe und
Hauptkomponenten

In Anlehnung an (Trost 2016)

Im Rahmen der Untersuchung werden insgesamt sechs Fahrzeugantriebe unterschieden, um ein breites Spektrum möglicher zukünftiger Entwicklungen abzubilden. Neben Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor (engl. Internal Combustion Engine - ICE), Hybridelektrofahrzeugen (engl. Hybrid Electric Vehicle - HEV), Plug-in Hybridelektrofahrzeugen (engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV), Elektrofahrzeugen mit Range Extender (engl. Range Extended Electric Vehicle - REEV) und rein batterieelektrischen Fahrzeugen (engl. Battery Electric Vehicle - BEV) werden ebenfalls Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV) erfasst.

Bei den unterstellten HEV handelt es sich hierbei um Vollhybride, die kurze Strecken rein elektrisch zurücklegen können, wobei die Hybridisierungsstufen Mikro und Mild als ausschließliche Effizienzsteigerungen des konventionellen Verbrennungsmotors berücksichtigt werden.

Kraftstoffe

Bei den möglichen zukünftigen Kraftstoffoptionen werden im Rahmen der Analysen neben den heute überwiegend im motorisierten Individualverkehr zum Einsatz kommenden mineralölbasierten Kraftstoffen Benzin und Diesel ebenfalls weitere alternative Energieträger berücksichtigt. Hierbei liegt ein Untersuchungsschwerpunkt auf erneuerbaren gasförmigen Kraftstoffen (Methan: PtG-CH₄ und Wasserstoff: PtG-H₂), die mit Hilfe der Power-to-Gas Technologie hergestellt werden können, sowie auf erneuerbarem elektrischen Strom für die unterschiedlichen Antriebskonzepte der Elektromobilität. Zusätzlich wird ebenfalls Erdgas (engl. Compressed Natural Gas - CNG) als weiterer fossiler Energieträger erfasst.

Die Nutzung der begrenzten nachhaltigen Potenziale für die Herstellung von Biokraftstoffen bleibt bei dieser Untersuchung den Verkehrssektoren vorbehalten, bei denen ein Umstieg auf andere emissionsarme Alternativen deutlich schwieriger erscheint (insbesondere Luft- und Schiffsverkehr).

2.1.1 Technische Parameter

Bei den technischen Parametern ist es zunächst erforderlich, die Vielfalt der heute existierenden Fahrzeugmodelle anhand der Fahrzeuggröße bzw. -segmente zu kategorisieren, um darauf aufbauend in handhabbarer Komplexität die zukünftige Entwicklung der spezifischen Kraftstoffverbräuche der jeweiligen Antriebskonzepte zu ermitteln. Diese beiden wesentlichen Eingangsgrößen werden nachfolgend vorgestellt und darüber hinaus fließen im Rahmen der Szenarioanalyse weitere Technologie-kriterien, wie beispielsweise die Fahrleistung sowie die Fahrzeugreichweiten der einzelnen Antriebstechnologien, mit ein.

Fahrzeuggrößenklasse

Um die Vielfalt an Fahrzeugmodellen in handhabbarem Umfang zu berücksichtigen, werden in Anlehnung an die Segmentierung des Kraftfahrt-Bundesamtes vier Fahrzeuggrößenklassen definiert (Klein, Mittel, Groß und leichte Nutzfahrzeuge). Die Kategorisierung des Kraftfahrt-Bundesamtes erfolgt hierbei u. a. auf Basis technischer Fahrzeugmerkmale und die so vorgenommene Kategorisierung ist in Tabelle 2-1 beschrieben.

Fahrzeuggrößenklasse	Kraftfahrt-Bundesamt Segmente
Klein (50 kW)	▪ Minis ▪ Kleinwagen
Mittel (80 kW)	▪ Kompaktklasse ▪ Mittelklasse ▪ Vans
Groß (130 kW)	▪ Obere Mittelklasse ▪ Oberklasse ▪ Geländewagen und SUVs ▪ Sportwagen
Leichte Nutzfahrzeuge (LNF) (80 kW)	▪ Pkw Utilities bzw. leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t

Tabelle 2-1:
Differenzierung der
Fahrzeuggrößenklassen

Für die in Abbildung 2-2 dargestellten sechs Antriebskonzepte und in Tabelle 2-1 definierten vier Fahrzeuggrößenklassen werden jeweils Referenzfahrzeuge anhand wesentlicher technischer Fahrzeugausprägungen (u. a. konventionelle und elektrische Antriebsleistung sowie Batteriekapazität) ausgelegt. Die unterstellten Entwicklungen des spezifischen Kraftstoffverbrauchs der Referenzfahrzeuge werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Kraftstoffverbrauch

Die fundierte Ermittlung der heutigen und zukünftigen spezifischen Kraftstoffverbräuche der einzelnen Fahrzeugantriebe ist ein wesentlicher Bestandteil der Technologiedatenbank, da diese ebenfalls für die ökonomische und ökologische Bewertung der Fahrzeugtechnologien von besonderer Relevanz sind.

Die in Tabelle 2-2 angegebenen durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche der mittleren Fahrzeuggrößenklasse bis zum Jahr 2050 basieren hierbei auf einer detaillierten Literaturrecherche, um heutige und zukünftige vorhersehbare Entwicklungen der jeweiligen Fahrzeugtechnologien abzuleiten und zu berücksichtigen (u. a. Leichtbau, Hybridisierung, Verbesserung der Motorentechnik). Für PHEV und REEV ist jeweils ein spezifischer konventioneller und elektrischer Verbrauch angegeben, wobei die elektrischen Verbräuche bereits Ladeverluste bzw. den Wirkungsgrad der Batterieladung beinhalten.

Die angenommenen Kraftstoffverbräuche kleiner Fahrzeuge liegen in etwa 20% unter und für Fahrzeuge der großen Fahrzeugklasse etwa 30% über den angegebenen Werten in Tabelle 2-2. Für LNF ist ein Aufschlag von 40% gegenüber der mittleren Fahrzeuggrößenklasse unterstellt.

Antriebskonzept	Kraftstoff	2013	2020	2030	2040	2050
ICE	Benzin	2,32	2,07	1,85	1,67	1,65
	Diesel	1,95	1,74	1,57	1,42	1,40
HEV	Benzin	1,73	1,58	1,47	1,33	1,31
	Diesel	1,45	1,33	1,25	1,13	1,11
BEV	Strom	0,87	0,78	0,70	0,65	0,64
PHEV	Benzin	2,38	2,11	1,88	1,69	1,66
	Strom	0,86	0,77	0,69	0,65	0,63
REEV	Benzin	2,41	2,14	1,91	1,72	1,68
	Strom	0,88	0,78	0,70	0,66	0,64
FCEV	Wasserstoff	1,45	1,28	1,11	1,02	1,01

Tabelle 2-2:
Entwicklung des realen spezifischen Kraftstoffbedarfs der mittleren Fahrzeuggrößenklasse in MJ/km 2013 bis 2050
Eigene Berechnungen und Annahmen i. W. basierend auf (Blesl et al. 2009; Smokers et al. 2011; Hill et al. 2012; Ernst et al. 2014; ADAC 2015)

Insgesamt ergeben sich für alle Antriebskonzepte langfristig bis zum Jahr 2050 deutliche Effizienzsteigerungen, die im Bereich von 23% bis 30% liegen. Hierbei werden ebenfalls bei konventionellen Verbrennungsmotoren zukünftig deutliche Fortschritte erwartet.

2.1.2 Ökonomische Kenngrößen

Zu den wesentlichen ökonomischen Kenngrößen zählen insbesondere die Endkundenpreise der verschiedenen Kraftstoffoptionen sowie die Anschaffungskosten der einzelnen Fahrzeugtypen. Deren getroffenen Annahmen werden nachfolgend im Detail vorgestellt. Darüber hinaus erfolgt im Rahmen des Fahrzeugbestandsmodells zusätzlich eine Differenzierung nach Kundengruppen mit verschiedenen Nutzungsdauern (privat zehn Jahre und gewerblich vier Jahre) sowie Käufertypen und es werden weitere wesentliche variable und fixe Betriebskosten (u. a. Wartungskosten und Steuern) berücksichtigt.²

² Bezugsgröße für die zukünftigen ökonomischen Kenngrößen ist die Preisbasis des Jahres 2013.

Kraftstoffpreise

Modelle und Datengrundlage

Die für das Basisszenario unterstellten Entwicklungen der Endkundenpreise der einzelnen Energieträger bis zum Jahr 2050 sind in Abbildung 2-3 zusammenfassend dargestellt. Generell wird für fossile Kraftstoffe zusätzlich zur allgemeinen Kostensteigerung ein CO₂-abhängiger Preisaufschlag angenommen, deren unterstellte Entwicklung auf der Sekundärachse angegeben ist und langfristig bis 2050 auf 130 EUR/t CO₂ ansteigt (siehe hierzu ebenfalls Tabelle 3-1).

Für die verschiedenen elektrischen Antriebskonzepte und für die Herstellung von gasförmigen Stromkraftstoffen (PtG-H₂ und PtG-CH₄) mittels der Power-to-Gas Technologie wird im Rahmen der Untersuchungen ein ausschließlich erneuerbarer Strombezug unterstellt. Hieraus ergeben sich die in Abbildung 2-3 dargestellten Preispfade.

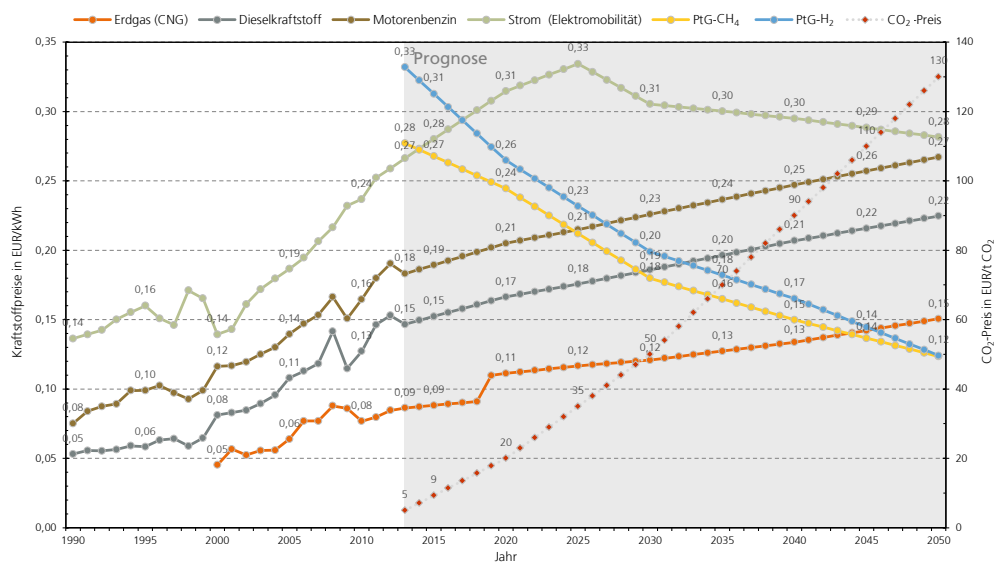


Abbildung 2-3:
Preisentwicklung der
Endkundenpreise
1990 bis 2050

Eigene Berechnungen und
Annahmen i. W. basierend auf
(Schlesinger et al. 2014); für
Power-to-Gas hauptsächlich
(DVGW 2013; Jentsch 2014;
Agora 2014) und für historische
Daten (MWV 2014; BDEW 2014)

Für die fossilen Kraftstoffe Benzin, Diesel und Erdgas steigt der Endkundenpreis bis 2050 gegenüber 2013 im Bereich von 46% bis 74%. Für Erdgas wird hierbei unterstellt, dass ab 2019 der heute gültige reduzierte Energiesteuersatz ausläuft, was zu einem deutlich sichtbaren Anstieg des Erdgaspreises führt.

Für den mittleren Strompreis wird für die Elektromobilität bis 2025 ein weiterer Preisanstieg in Anlehnung an (Schlesinger et al. 2014) unterstellt, der langfristig bei sinkenden Gestehungskosten und abnehmender Umlage für die erneuerbaren Energien (EE) wieder abnimmt.

Die für die Ermittlung der Endkundenpreise unterstellten Investitionskosten für die PtG-Technologie zur Herstellung von erneuerbarem Methan sinken von heute 2000 EUR/kW langfristig um etwa 63% auf 750 EUR/kW bis zum Jahr 2050. Für die Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff reduzieren sich die PtG-Investitionskosten von 1400 EUR/kW auf 525 EUR/kW im identischen Zeitraum. Gleichzeitig steigt die Auslastung der PtG-Anlagen aufgrund eines verstärkten Ausbaus der erneuerbaren Energien auf langfristig etwa 4000 Volllaststunden bei unterstellten jährlichen Betriebskosten in Höhe von 2% der Investitionskosten. Zudem wird eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades für die Bereitstellung von erneuerbarem Methan für den MIV von heute 54% auf 61% bis zum Jahr 2050 und für erneuerbaren Wasserstoff im

Mittel für die verschiedenen Distributionspfade von 55% auf 65% im selben Zeitraum unterstellt.³ Der angenommene Strombezugspreis für die PtG-Anlagen orientiert sich heute an den Konditionen der stromintensiven Industrie mit 5,5 ct/kWh, der langfristig bis 2050 u. a. aufgrund des flexiblen Anlageneinsatzes auf etwa 3,5 ct/kWh sinkt.

Fahrzeugpreise

Die Erhebung der einzelnen Fahrzeugpreise erfolgt auf Basis der nachfolgenden Hauptkomponenten der einzelnen Antriebskonzepte (siehe hierzu ebenfalls Abbildung 2-2), wobei deren zukünftigen Kostenentwicklungen hierbei u. a. durch Erfahrungskurven, in Abhängigkeit von der jeweiligen Marktdurchdringung, abgeleitet werden.

- Basisfahrzeug (umfasst alle nicht antriebsrelevanten Bauteile)
- Verbrennungsmotor und Getriebe
- Elektromotor und Leistungselektronik
- Brennstoffzellensystem
- Fahrzeugbatterie
- Kraftstofftank
- ggf. Mehrwertsteuer

Die auf Komponentenebene ermittelten Anschaffungspreise der verschiedenen Antriebstechnologien sind für die mittlere Fahrzeuggrößenklasse in Abbildung 2-4 dargestellt. Hierbei sind in Abbildung 2-4a die Fahrzeugpreise für das Ausgangsjahr 2013 und in Abbildung 2-4b für das langfristige Zieljahr 2050 des Basisszenarios angegeben.

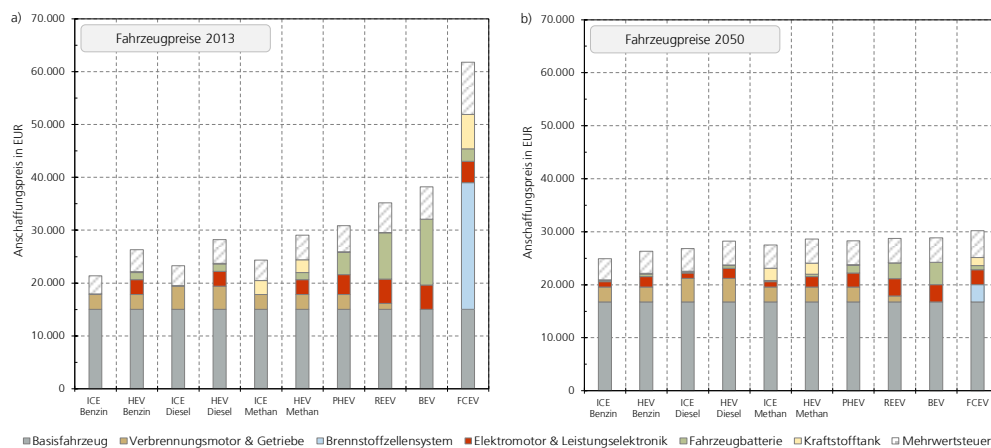


Abbildung 2-4:
Fahrzeugpreise des
Basisszenarios im
Ausgangsjahr 2013 und
Zieljahr 2050

Eigene Berechnungen und
Annahmen i. W. basierend auf
(Blesl et al. 2009; Mock 2010;
McKinsey & Company 2010; Hill
et al. 2012; Cambridge
Econometrics, Ricardo-AEA
2013; Hülsmann et al. 2014;
ADAC 2015)

Erwartungsgemäß hat die Fahrzeugbatterie bei den verschiedenen elektrischen Fahrzeugantrieben (BEV, PHEV und REEV) heute einen wesentlichen Anteil an den

³ Für die Bereitstellung von erneuerbarem Wasserstoff mit Hilfe der PtG-Technologie werden insgesamt vier verschiedene Erzeugungs- und Distributionspfade mit unterschiedlichen Versorgungsinfrastrukturkosten unterschieden. Neben einer dezentralen H₂-Produktion an der Tankstelle werden zusätzlich drei weitere zentrale Bereitstellungspfade berücksichtigt. Der Transport erfolgt je nach Anforderung hierbei zum einen per Pipeline oder mittels Lkw (gasförmig oder flüssig).

Gesamtfahrzeugkosten und liegt im Bereich von 14% bis 33%, sodass sich beispielsweise für BEV Mehrkosten von 79% gegenüber dem günstigsten Fahrzeug mit Ottomotor in mittleren Fahrzeuggrößenklasse ergeben. Bei FCEV dominieren insbesondere die Brennstoffzellenkosten den Fahrzeugpreis und führen in der Markteinführung insgesamt zu einem Preisaufschlag von 190%.

Langfristig gleichen sich die Fahrzeugpreise nach einer erfolgreichen Markteinführungsphase von innovativen Fahrzeugantrieben und startender Serienproduktion bis zum Jahr 2050 zunehmend an. Beispielsweise schrumpft der maximale Preisaufschlag 2050 bei FCEV gegenüber einem Fahrzeug mit Ottomotor auf etwa 28%.

2.2 Fahrzeugbestandsmodell

Das für die umfangreichen Simulationen und Analysen der zukünftigen Marktdurchdringungen alternativer Fahrzeugantriebe und Kraftstoffe eingesetzte Fahrzeugbestandsmodell basiert im Wesentlichen auf (Trost 2016), dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 2-5 dargestellt ist.

Grundsätzlich ermöglicht das genutzte Bottom-up Modell, das auf einem disaggregierten Nachfragemodell und einem dynamischen Stock-Flow-Ansatz basiert, die jährlichen Entwicklungen des Fahrzeugbestands in Deutschland zu simulieren und darzustellen. Insgesamt werden im Rahmen der Simulationen pro Fahrzeuggrößenklasse (siehe Tabelle 2-1) 19 mögliche Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen erfasst, sodass insgesamt 76 Optionen betrachtet werden. Dieser hohe Detaillierungsgrad ermöglicht entsprechend umfassende und aussagekräftige Analysen zukünftiger Marktanteilsentwicklungen der unterschiedlichen elektrischen Antriebskonzepte sowie des Einsatzes der Power-to-Gas Technologie zur Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen Stromkraftstoffen für den MIV.

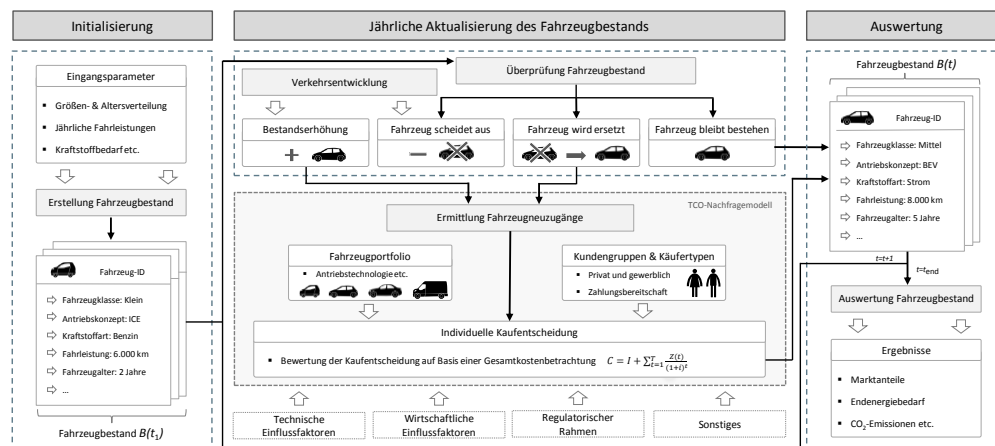


Abbildung 2-5:
Methodischer Ablauf des
Fahrzeugbestandsmodells
(Trost 2016)

Zu Beginn der Simulationen ist es im Rahmen der Modellinitialisierung erforderlich, den aktuellen Fahrzeugbestand mit etwa 44 Mio. Fahrzeugen in Deutschland als Ausgangsbasis inklusive aller für die Simulationen notwendigen Parameter für ein Startjahr zu erfassen. Hierzu werden auf Fahrzeugebene eine Vielzahl fahrzeug- und altersspezifischer Größen erfasst, um diese mit der notwendigen Detailtiefe abzubilden (siehe hierzu Abschnitt 2.1).

Anschließend erfolgt eine Überprüfung des Bestands auf Fahrzeugebene in Jahresschritten. Die Überprüfung erfolgt hierbei mit Hilfe sogenannter Überlebenskurven, die die Wahrscheinlichkeit der Bestandszugehörigkeit in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter beschreiben. Bleibt das Fahrzeug im Bestand, werden lediglich die altersabhängigen Parameter (z. B. Fahrzeugalter, Jahresfahrleistung) angepasst. Scheidet ein Fahrzeug aus und wird durch ein Neufahrzeug ersetzt, wird für die Simulation der Kaufentscheidung ein Total Cost of Ownership (TCO)–Nachfragemodell genutzt. Die Ermittlung der TCO erfolgt hierbei über die gesamte Nutzungs- bzw. Halterdauer eines Fahrzeugs und schließt die Anschaffungskosten und ggf. einen Restwert sowie alle relevanten variablen und fixen Betriebskosten mit ein.

Die anschließende Fahrzeugauswahl bzw. Kaufentscheidung geschieht auf Grundlage der günstigsten Gesamtnutzungskosten aller möglichen Alternativen des Kunden, wobei individuelle Mehrzahlungsbereitschaften für innovative Antriebstechnologien mit berücksichtigt werden können. Zusätzlich besteht im Modell die Möglichkeit, verschiedene übergreifende exogene Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen (u. a. Entwicklung der zukünftigen Verkehrsleistung oder Änderungen des regulatorischen Rahmens) abzubilden.

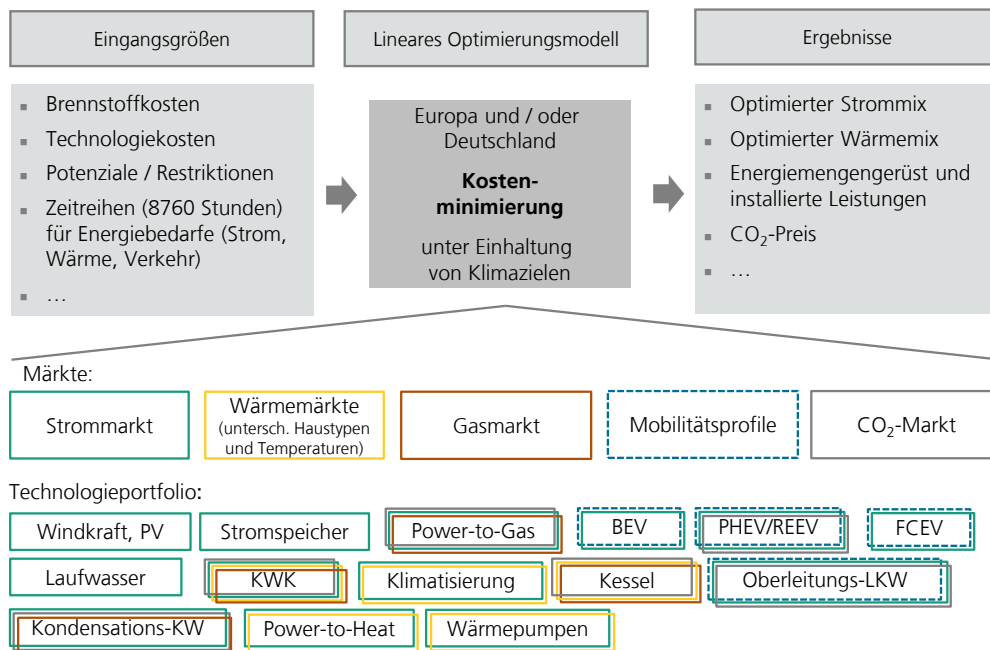
Abschließend bieten die Simulationsergebnisse umfangreiche Auswertungsmöglichkeiten des Fahrzeugbestands u. a. in Bezug auf die Bestandsentwicklung, Neuzulassungsstruktur, Endenergiebedarf oder die absoluten CO₂-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs.

2.3 Einsatz- und Ausbauoptimierung

Zur Beurteilung der zukünftigen Kopplung des Strom- und Verkehrssektors, insbesondere durch die zunehmende Integration der Elektromobilität sowie die Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen Kraftstoffen mit Hilfe der Power-to-Gas Technologie, wird im Rahmen der Arbeit das Fraunhofer IWES Modell »SCOPE« angewendet.

Bei dem linearen Optimierungsmodell handelt es sich um ein Fundamentalmodell zur Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung. Ziel ist die Kostenminimierung aller relevanten Investitions- und Einsatzentscheidungen zur Deckung einer modellexogen vorgegebenen Strom-, Wärme- und Verkehrsnachfrage. Zusätzlich gilt es eine Obergrenze der Treibhausgasemissionen einzuhalten. Hierbei wird Deutschland im europäischen Energiesystem unter Berücksichtigung der Austauschkapazitäten anhand grenzübergreifender Netzkuppelstellen abgebildet.

Der grundsätzliche methodische Aufbau und Ablauf der genutzten Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung ist in Abbildung 2-6 dargestellt, die im Wesentlichen auf den Arbeiten und Veröffentlichungen von (von Oehsen 2012; Jentsch 2014; IWES et al. 2015) beruht. Zusätzlich beinhaltet (IWES 2015) weitergehende Informationen zur existierenden Modellfamilie des Fraunhofer IWES und (Trost 2016) bietet eine mathematische Modellbeschreibung der Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung, die einen Schwerpunkt auf die Modellierung des Verkehrssektors legt.



Modelle und Datengrundlage

Abbildung 2-6:
Methodischer Aufbau der
Einsatz- und
Ausbauoptimierung

Eingangs werden für die Simulation vielfältige Erzeugungs- und Speichertechnologien anhand relevanter technischer und ökonomischer Eingangsdaten beschrieben. Hierfür verfügt das Fraunhofer IWES über eine umfassende Datenbasis für Deutschland und den europäischen Raum, die fortlaufend erweitert und aktualisiert wird. Die anschließende Modellierung selbst erfolgt anhand von sogenannten Märkten, die die jeweiligen fundamentalen Zusammenhänge im Optimierungsmodell abbilden.

Die Simulationsergebnisse bieten anschließend vielseitige Auswertungsmöglichkeiten u. a. zu Energiemengengerüsten und Ausbauleistungen der jeweiligen Technologien oder Analysen zum Bedarf und Einsatz einzelner Flexibilitätsoptionen.

Generell arbeitet das Modell mit einer stündlichen Auflösung wobei i. d. R. ein Kalenderjahr geschlossen optimiert wird. Die Kraftwerks- und Speicherausbau-optimierung ist in MATLAB umgesetzt und zur Lösung der Optimierungsaufgabe ist der kommerzielle Solver IBM ILOG CPLEX integriert.

3 Ergebnisse der Fahrzeugbestandsentwicklung

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Simulation der zukünftigen Fahrzeugbestandsentwicklung für das entwickelte Basisszenario vorgestellt (Abschnitt 3.1). Im Detail erfolgt hierbei i. W. eine Auswertung in Bezug auf die zukünftige Fahrzeugbestandsentwicklung, die Neuzulassungsstruktur differenziert nach Fahrzeuggrößenklassen sowie die langfristige Entwicklung des Endenergiebedarfs und die damit verbundenen CO₂-Emissionen im MIV. Zusätzlich wird der Einfluss einer unterschiedlich hohen emissionsabhängigen Besteuerung fossiler Kraftstoffe auf die zukünftige Marktdiffusion anhand einer Sensitivitätsanalyse untersucht, deren Ergebnisse in Abschnitt 3.2 beschrieben werden. Generell wird bei den Szenariosimulationen für die Verkehrsleistung im MIV unterstellt, dass diese bis 2050 weitestgehend konstant bleibt.

3.1 Basisszenario

Beim entwickelten Basisszenario wird wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, für fossile Kraftstoffe ein CO₂-abhängiger Preisaufschlag angenommen, um die negativen externen Umwelteffekte verbrauchsorientiert zu internalisieren und zusätzlich die Marktdiffusion innovativer Antriebskonzepte und erneuerbarer Kraftstoffe zu beschleunigen. In diesem Zusammenhang wird für die verschiedenen elektrischen Antriebskonzepte und für die Herstellung von gasförmigen Stromkraftstoffen ein ausschließlich erneuerbarer Strombezug unterstellt.

Entwicklung des Fahrzeugbestands

Die ermittelte relative Bestandsentwicklung im MIV in Deutschland ist für das Basisszenario im Zeitraum von 2013 bis 2050 in Abbildung 3-1 dargestellt. Grundsätzlich geht aus der Fahrzeugbestandsentwicklung hervor, dass es mittel- bis langfristig zu einer immer stärkeren Diversifizierung der Antriebskonzepte sowie der Energieträgerbasis kommt. Zusätzlich wird die notwendige Zeit für einen grundlegenden Strukturwandel im MIV deutlich, da die jährlichen Neuzulassungen nur etwa 7% des gesamten Fahrzeugbestands (Pkw und LNF) umfassen.

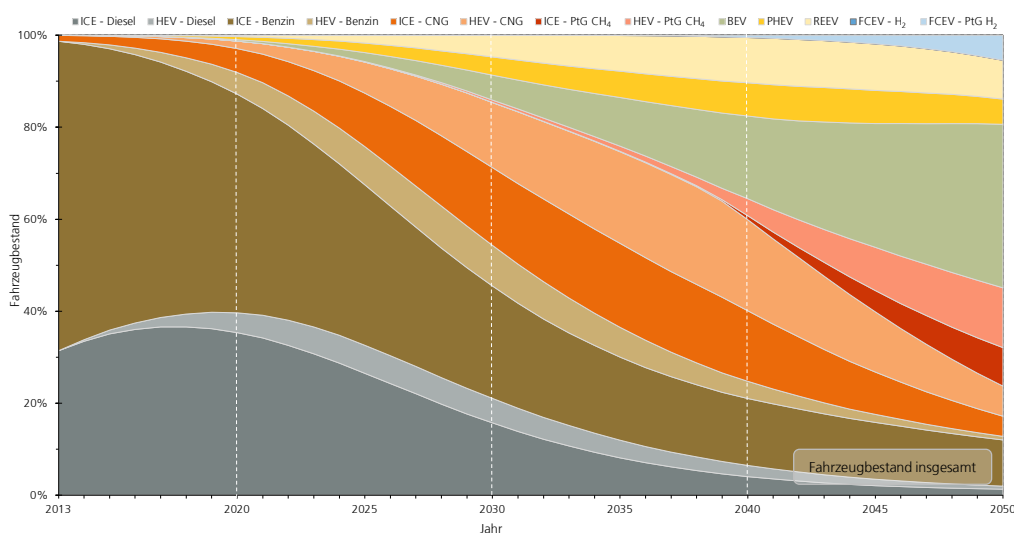


Abbildung 3-1:
Fahrzeugbestandsentwicklung
des Basisszenarios 2013 bis
2050

Im Basisszenario zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg an Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV und REEV), die 2050 einen Anteil von etwa 50% am Gesamtbestand erreichen. Jedoch wird das politisch gesetzte Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 (Deutsche Bundesregierung 2009) in diesem Szenario mit etwa 570 000 Elektrofahrzeugen nicht erreicht. Durch eine erfolgreiche Markteinführung und weitere Marktdurchdringung der Elektromobilität sind es zehn Jahre später dagegen bereits 6,4 Millionen Elektrofahrzeuge.

Im Vergleich zum heutigen durch die fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel dominierten Fahrzeugbestand ist die mittelfristige Entwicklung aufgrund geringerer CO₂-Emissionen maßgeblich durch eine hohe Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit Erdgas (ICE und HEV) geprägt. Deren Anteil steigt bis 2035 auf etwa 38% am Gesamtbestand und wird langfristig durch Power-to-Gas Methan als erneuerbare Kraftstoffoption abgelöst, wenn diese unter den getroffenen technischen und ökonomischen Annahmen in etwa Kostenparität mit Erdgas erreicht (siehe Abbildung 2-3).

Zusätzlich wird ersichtlich, dass der Dieselantrieb langfristig fast vollständig aus dem Fahrzeugbestand verschwindet.

Entwicklung der Neuzulassungsstruktur

Die in Abbildung 3-2 dargestellte Entwicklung der relativen jährlichen Fahrzeugneuzulassungen differenziert nach Fahrzeuggrößenklassen spiegelt erwartungsgemäß die beschriebenen Entwicklungen des Fahrzeugbestands bis zum Jahr 2050 wider (siehe Abbildung 3-1). Jedoch zeigt sich hierbei ein deutlicher Einfluss der Fahrzeuggrößenklasse und damit verbundenen verschiedenen Anschaffungskosten und Nutzerprofilen auf die Neuzulassungsstruktur.

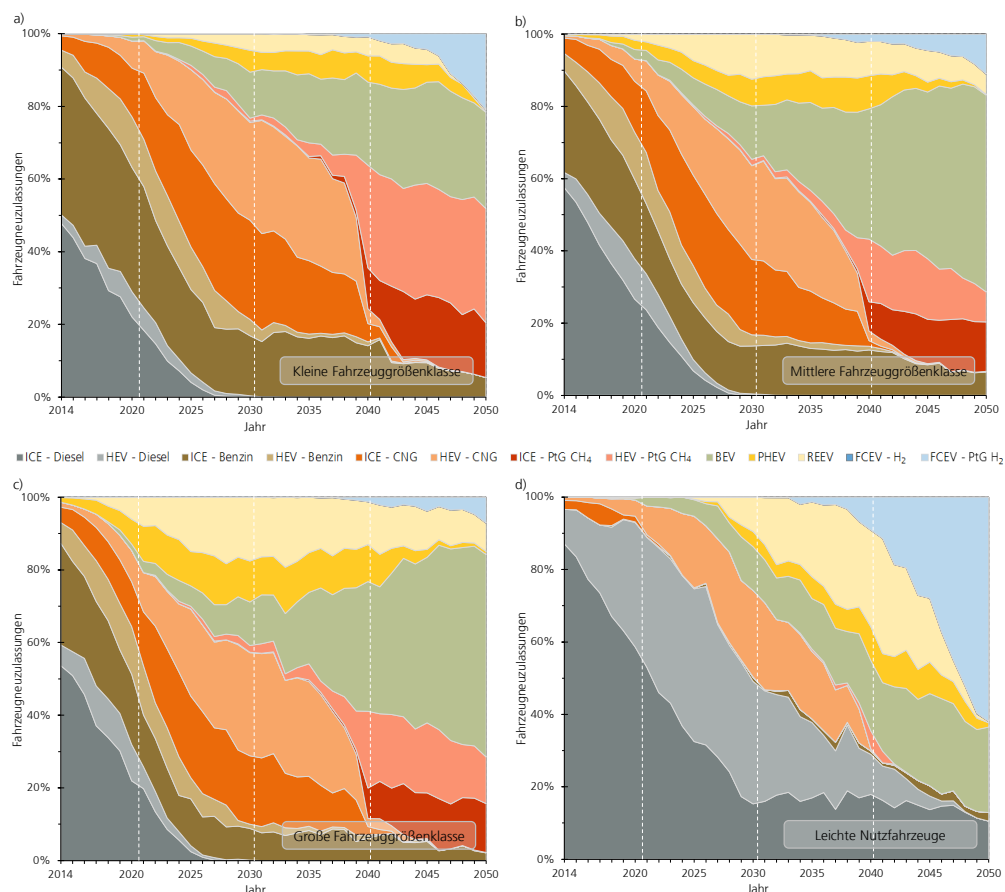


Abbildung 3-2:
Entwicklung der
Neuzulassungen des
Basisszenarios differenziert
nach Fahrzeuggrößenklassen
2014 bis 2050

Zunächst entwickeln sich die Neuzulassungen in der kleinen und mittleren Fahrzeuggrößenklasse kurz- bis mittelfristig sehr ähnlich (siehe hierzu Abbildung 3-2a und b), wobei diese hauptsächlich durch Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor (Diesel, Benzin und mit der Zeit insbesondere Erdgas) dominiert werden.

Bei zukünftig sinkenden Batteriekosten und zunehmender Überwindung der Reichweitenbegrenzung von Elektrofahrzeugen erfolgt langfristig insbesondere in der mittleren Fahrzeuggrößenklasse eine Verschiebung zu BEV, die 2050 einen Anteil von 55% an den Neuzulassungen erreichen. Gleichzeitig erhöhen sich ab etwa 2035 die Pkw-Neuzulassungen mit PtG-Methan als erneuerbare Kraftstoffoption, die aufgrund niedriger Jahresfahrleistungen und entsprechenden Verhältnis zwischen Anschaffungs- und Betriebskosten vermehrt in der kleinen Fahrzeuggrößenklasse zugelassen werden.

Im großen Fahrzeugsegment (siehe Abbildung 3-2c) überwiegen in der Anfangsphase bei den Elektrofahrzeugen insbesondere Hybridkonzepte mit Möglichkeit der externen Batterieladung (PHEV und REEV) mit entsprechend hohen Jahresfahrleistungen bei gleichzeitig vorteilhaften Nutzungsprofilen für die Elektromobilität, die jedoch auch hier langfristig weitestgehend durch rein batterieelektrische Fahrzeuge abgelöst werden.

Aufgrund der durchschnittlich hohen Jahresfahrleistungen und Nutzerprofilen dominiert der Dieselantrieb (ICE und HEV) kurz- bis mittelfristig die Neuzulassungsstruktur der LNF (siehe Abbildung 3-2d). Bei langfristig sinkenden Kosten für Brennstoffzellen und für die Bereitstellung von PtG-Wasserstoff erhöht sich entsprechend der Neuzulassungsanteil von FCEV signifikant, hat jedoch in den anderen Fahrzeugklassen nur eine untergeordnete Rolle.

Entwicklung des Endenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen

Die beschriebenen Fahrzeugbestandsentwicklungen und Neuzulassungen haben ebenfalls deutliche Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung des Endenergiebedarfs und die dazugehörigen CO₂-Emissionen. Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, entfallen heute jährlich etwa 420 TWh Endenergie sowie 110 Mio. t CO₂-Emissionen auf den MIV, der hauptsächlich durch die mineralölbasierten Kraftstoffe Benzin und Diesel geprägt ist.

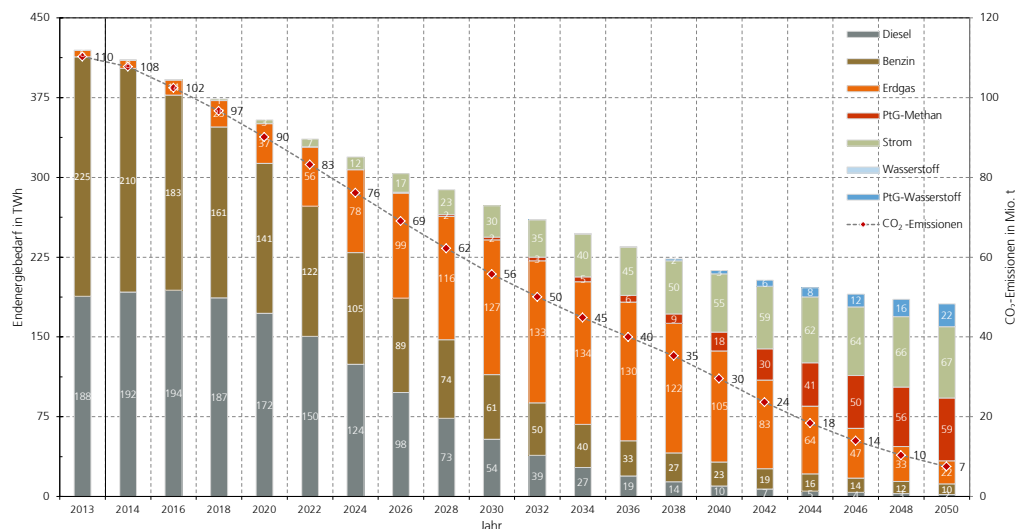


Abbildung 3-3:
Entwicklung des
Endenergiebedarfs und der
CO₂-Emissionen des
Basisszenarios 2013 bis 2050

Aufgrund kontinuierlicher Effizienzsteigerungen des konventionellen Fahrzeugantriebs (siehe hierzu Tabelle 2-2) und einer verstärkten Marktdurchdringung der effizienten Elektromobilität kann der Endenergiebedarf bis 2020 um 16% und langfristig bis zum Zieljahr 2050 um 57% bezogen auf 2013 gesenkt werden. Gleichzeitig reduziert sich der Ausstoß an CO₂-Emissionen im Basisszenario bis 2050 auf 7 Mio t. CO₂, was einer Reduktion von 93% gegenüber heute entspricht. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass für die Elektromobilität und für die Herstellung von gasförmigen Stromkraftstoffen ein ausschließlich erneuerbarer Strombezug unterstellt wird (siehe Abschnitt 2.1.2).⁴

Der in Abbildung 3-1 mittelfristig deutlich erkennbare steigende Anteil von Fahrzeugen mit Erdgas als Kraftstoff (ICE und HEV) sorgt für einen deutlichen Nachfrageanstieg auf über 130 TWh der langfristig bis 2050 wieder auf 22 TWh Erdgas absinkt und zu Teilen durch PtG-Methan ersetzt wird. Gleichzeitig sinkt der Bedarf an den fossilen Kraftstoffen Benzin und Diesel, sodass diese trotz heutiger deutlicher Dominanz langfristig nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Durch den zunehmenden Anteil der verschiedenen elektrischen Fahrzeugkonzepte steigt ebenfalls der direkte Strombedarf des MIV im Basisszenario deutlich an, von etwa 3 TWh im Jahr 2020 über 30 TWh 2030 und langfristig auf etwa 67 TWh im Jahr 2050.

Entwicklung der Total Cost of Ownership

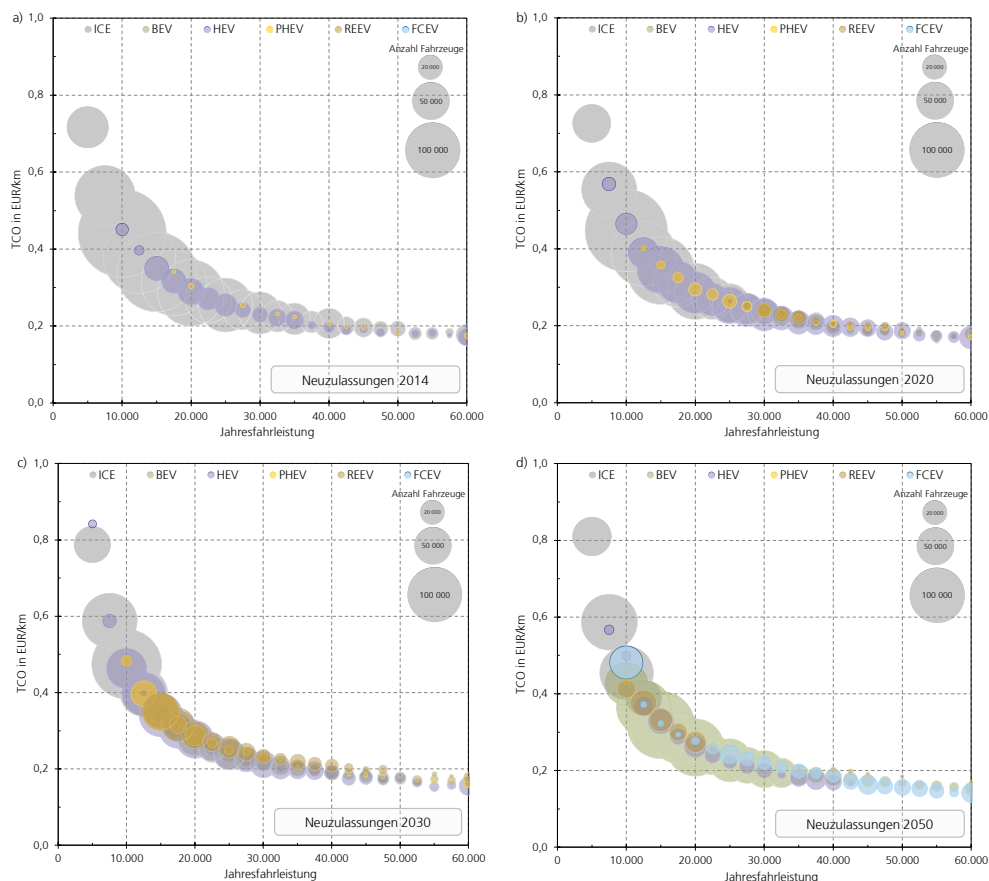


Abbildung 3-4:
Entwicklung der Total Cost of
Ownership des Basisszenarios
2014 bis 2050

⁴ Dies entspricht in den Anfangsjahren einer sehr progressiven Annahme, die jedoch langfristig mit voranschreitendem EE-Ausbau durch die Analysen des Energieversorgungssystems in Kapitel 4 bestätigt wird.

In Abbildung 3-4 sind die ermittelten Neuzulassungen der mittleren Fahrzeuggrößenklasse für die Jahre 2014, 2020, 2030 und 2050 in Abhängigkeit der mittleren Jahresfahrleistung und der berechneten Gesamtnutzungskosten (TCO) dargestellt. Zusätzlich repräsentiert die Größe der Kreise die jeweilige Fahrzeuganzahl der einzelnen Antriebskonzepte. Erwartungsgemäß zeigen sich übergreifend für alle dargestellten Jahre abnehmende spezifische Kilometerkosten mit steigender Jahresfahrleistung.

Heute dominiert der konventionelle Verbrennungsmotor ICE über die gesamte Bandbreite der Jahresfahrleistungen die Neuzulassungsstruktur mit einem Anteil von etwa 90% (siehe Abbildung 3-4a), der jedoch bis 2020 insbesondere im Bereich von Jahresfahrleistungen über 15 000 km durch Hybridelektrofahrzeuge (HEV) abgelöst wird (siehe hierzu Abbildung 3-4b).

Wie bereits bei der Analyse der Neuzulassungsstruktur festgestellt, steigt mittel- bis langfristig bei sinkenden Anschaffungskosten der elektrischen Antriebskonzepte (PHEV, REEV und BEV) deren Marktanteil deutlich an (siehe Abbildung 3-4b und c). Bei Jahresfahrleistungen über 10 000 km erreichen diese 2030 bereits einen Anteil von etwa 46% an den Neuzulassungen der mittleren Fahrzeuggrößenklasse, deren Anteil bis 2050 auf 74% weiter ansteigt. Im Jahr 2050 dominieren hierbei insbesondere BEV die Neuzulassungsstruktur und zusätzlich setzen sich ab 10 000 km Jahresfahrleistung FCEV durch.

3.2 Sensitivitätsanalyse

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, wird im Basisszenario für eine verursachungsgerechte Internalisierung der externen Umwelteffekte eine emissionsabhängige Besteuerung fossiler Kraftstoffe unterstellt. Um den Einfluss einer unterschiedlich hohen CO₂-Besteuerung auf die Fahrzeugbestandsentwicklung im Detail zu untersuchen, erfolgt in diesem Abschnitt die Analyse verschiedener CO₂-Preispfade, deren unterstellte Entwicklungen in Tabelle 3-1 angegeben sind.⁵

Szenariovariante	2020	2030	2040	2050
Keine CO ₂ -Steuer	0	0	0	0
Geringe CO ₂ -Steuer	15	30	40	50
Mittlere CO ₂ -Steuer (Basisszenario)	20	50	90	130
Hohe CO ₂ -Steuer	30	90	150	200
Sehr hohe CO ₂ -Steuer	50	200	300	400

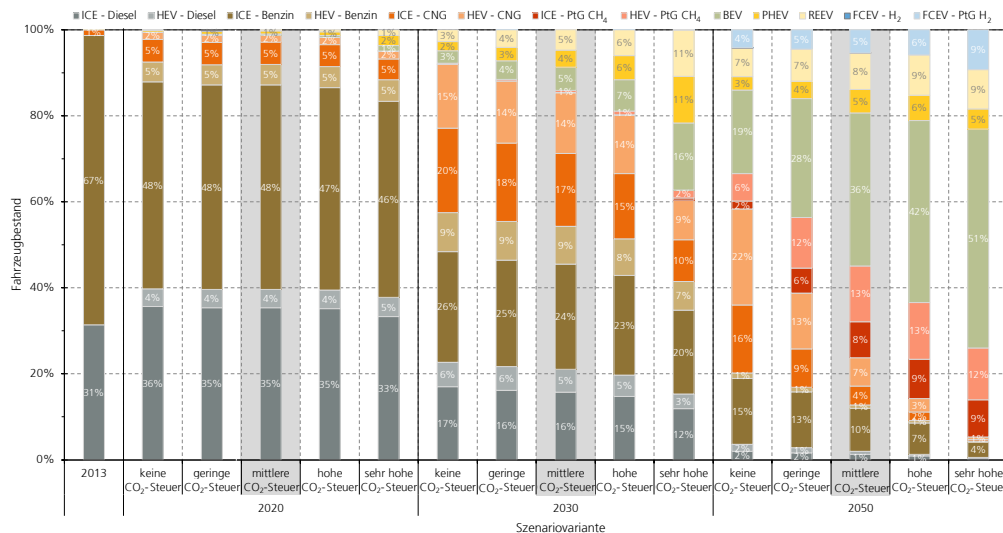
Tabelle 3-1:
Unterstellte
CO₂-Preisentwicklungen bis
2050 in EUR/t CO₂

Die betrachtete Bandbreite erstreckt sich hierbei vom heutigen Status Quo, ohne eine zusätzliche CO₂-Besteuerung (Keine CO₂-Steuer), bis hin zu einer sehr hohen emissionsabhängigen Besteuerung, die auf 400 EUR/t CO₂ bis zum Jahr 2050 ansteigt (Sehr hohe CO₂-Steuer).

⁵ Die Umsetzung einer emissionsabhängigen Besteuerung fossiler Kraftstoffe kann beispielsweise durch eine Ausweitung des Emissionshandels erfolgen (siehe hierzu beispielsweise Hermann et al. 2014).

Fahrzeugbestandsentwicklung

Die Entwicklung der relativen Fahrzeugbestände in Abhängigkeit der untersuchten emissionsabhängigen Besteuerung sind für die Jahre 2020, 2030 und 2050 in Abbildung 3-5 dargestellt. Zusätzlich ist die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands im Startjahr 2013 mit angegeben und das bekannte Basisszenario mit einer mittleren CO₂-Besteuerung in grau hervorgehoben.



Ergebnisse der Fahrzeugbestandsentwicklung

Abbildung 3-5:
Fahrzeugbestandsentwicklung
in Abhängigkeit der
emissionsabhängigen
Besteuerung 2013 bis 2050

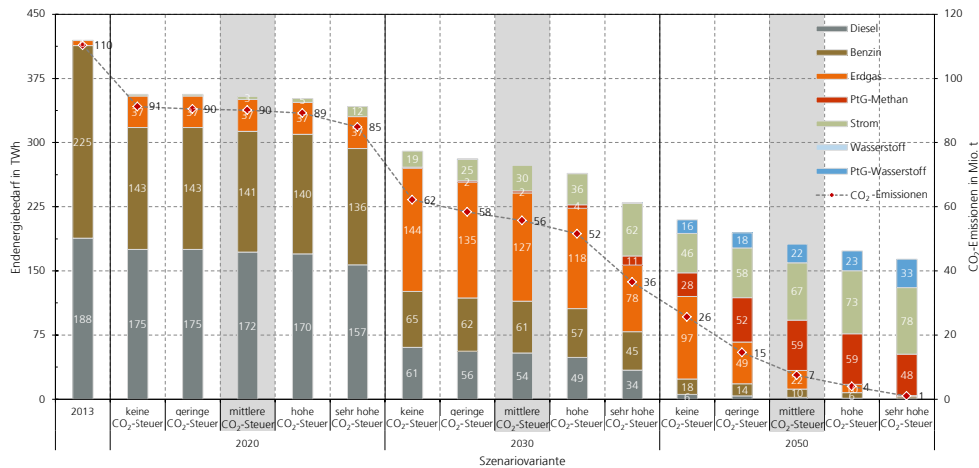
Eine steigende CO₂-Besteuerung fossiler Kraftstoffe führt erwartungsgemäß zu einer stärkeren Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte und Kraftstoffe. Beispielsweise liegt der Anteil an Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV und REEV) ohne eine zusätzliche CO₂-Besteuerung 2030 bei 8% am Gesamtbestand der bis zum Jahr 2050 auf 29% ansteigt. Im Gegensatz dazu nimmt der Anteil der Elektrofahrzeuge bei einer angenommenen sehr hohen Emissionsbesteuerung von 37% auf 65% im identischen Zeitraum zu.

Gleichzeitig ist in Abbildung 3-5 zu erkennen, dass der Einsatz von gasförmigen Stromkraftstoffen ebenfalls mit steigender CO₂-Besteuerung zunimmt. So liegt der Anteil an Fahrzeugen mit PtG-CH₄ und PtG-H₂ am Gesamtbestand im Jahr 2050 bei der Szenariovariante ohne CO₂-Besteuerung bei 12% und steigt auf 30% bei unterstellten CO₂-Kosten von 400 EUR/t CO₂.

Bei einer genaueren Analyse zeigt sich, dass der Einsatz von PtG-CH₄ mit zunehmender CO₂-Besteuerung zunächst deutlich ansteigt jedoch bei höheren CO₂-Kosten konstant bleibt bzw. leicht abnimmt. Dieser Effekt lässt sich auf die höhere Marktdurchdringung der effizienten elektrischen Antriebskonzepte zurückführen, da hierdurch die implementierte Lernkurve zur Ermittlung der Batteriekosten schneller durchschritten werden kann.

Entwicklung des Endenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen

Die sich aus den in Abbildung 3-5 dargestellten Fahrzeugbestandsentwicklungen ergebenden Entwicklungen des zukünftigen Endenergiebedarfs differenziert nach Energieträgern sind in Abbildung 3-6 in Abhängigkeit der verschiedenen CO₂-Preispfade zusammengestellt.



Ergebnisse der Fahrzeugbestandsentwicklung

Abbildung 3-6: Entwicklung des Endenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der emissionsabhängigen Besteuerung 2013 bis 2050

Die unterstellten zukünftigen Effizienzsteigerungen der verschiedenen Antriebkonzepte sowie eine verstärkte Hybridisierung und Elektrifizierung des Antriebsstrangs haben, wie bereits beim Basisszenario festgestellt (siehe Abschnitt 3.1), insgesamt einen deutlichen Einfluss auf den Endenergiebedarf und die zugehörigen CO₂-Emissionen.

Beispielsweise reduziert sich der Endenergiebedarf von heute 420 TWh ohne eine weitergehende CO₂-Besteuerung fossiler Kraftstoffe um 31% auf 290 TWh bis zum Jahr 2030 und langfristig bis 2050 kommt es etwa zu einer Halbierung. Gleichzeitig sinken die CO₂-Emissionen im MIV im Vergleich zu heute mit etwa 110 Mio. t CO₂ bis zum Jahr 2030 um 44% und langfristig bis 2050 um 77% auf 26 Mio. t CO₂ unter der Annahme eines ausschließlich erneuerbaren Strombezugs für die Elektromobilität und die Power-to-Gas Technologie.

Eine steigende CO₂-Besteuerung fossiler Kraftstoffe führt in diesem Zusammenhang, wie bereits festgestellt, zu einer höheren Marktdurchdringung der elektrischen Antriebkonzepte, sodass sich der Verbrauch weiter in Richtung Strom verschiebt und insgesamt aufgrund der hohen Effizienz der Elektromobilität weiter abnimmt. So reduziert sich der Endenergiebedarf im Fall des sehr hohen CO₂-Preispfades bis 2050 im Vergleich zu heute um 61% auf 164 TWh und gleichzeitig können durch einen vermehrten Einsatz von gasförmigen Stromkraftstoffen die CO₂-Emissionen auf nahezu Null gesenkt werden.

Aus den dargestellten Szenarioergebnissen wird sehr deutlich, dass der beschriebene Struktur- und Systemwandel im MIV zur Deckung des zusätzlichen direkten und indirekten Strombedarfs für die Elektromobilität sowie zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen einen zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert. Die sich hieraus ergebende Sektorenkopplung sowie deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem werden im nachfolgenden Kapitel 4 nähergehend untersucht.

4 Ergebnisse der Sektorenkopplung Strom-Verkehr

Für die Analyse der zukünftig verstärkten Kopplung des Strom- und Verkehrssektors wird die in Abschnitt 2.3 beschriebene Kraftwerks- und Speicherausbauroptimierung genutzt. Die hiermit ermittelten Simulationsergebnisse werden in den Abschnitten 4.1 und 4.2 vorgestellt. Ziel ist die Bewertung des langfristigen Einflusses der in Kapitel 3 beschriebenen Verkehrsszenarien des MIV und des damit verbundenen zusätzlichen mobilitätsbedingten Strombedarfs auf die deutsche und europäische Energieversorgungsstruktur im Jahr 2050. Zusätzlich erfolgt in Abschnitt 4.3 eine Bewertung möglicher Anlagenstandorte für PtG in Deutschland mit besonderem Fokus auf das EWE-Netzgebiet.

Szenariorahmen und -annahmen

Für einen konsistenten Szenariorahmen werden wesentliche erforderliche Annahmen und Kenngrößen der Strom- und Wärmeerzeugung sowie der verbleibenden Verkehrsträger aus dem Projekt „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ (IWES et al. 2015) übernommen, dessen Abschlussbericht vertiefende Informationen bereitstellt. Auf Basis der dort erzielten Ergebnisse erfolgt für die im Rahmen dieses Berichts durchgeführten Optimierungsrechnungen eine Festsetzung der Technologiezusammensetzung und installierten Leistungen der einzelnen Anlagen für den Wärmesektor. Dies ermöglicht eine selektive Bewertung und Untersuchung der zukünftigen Interaktion zwischen dem Strom- und Verkehrssektor. Der unterstellte Wärmebedarf sowie die angenommenen Technologiezusammensetzungen differenziert nach Anwendungsfeldern sind in Abbildung 4-1 für das Jahr 2050 dargestellt.

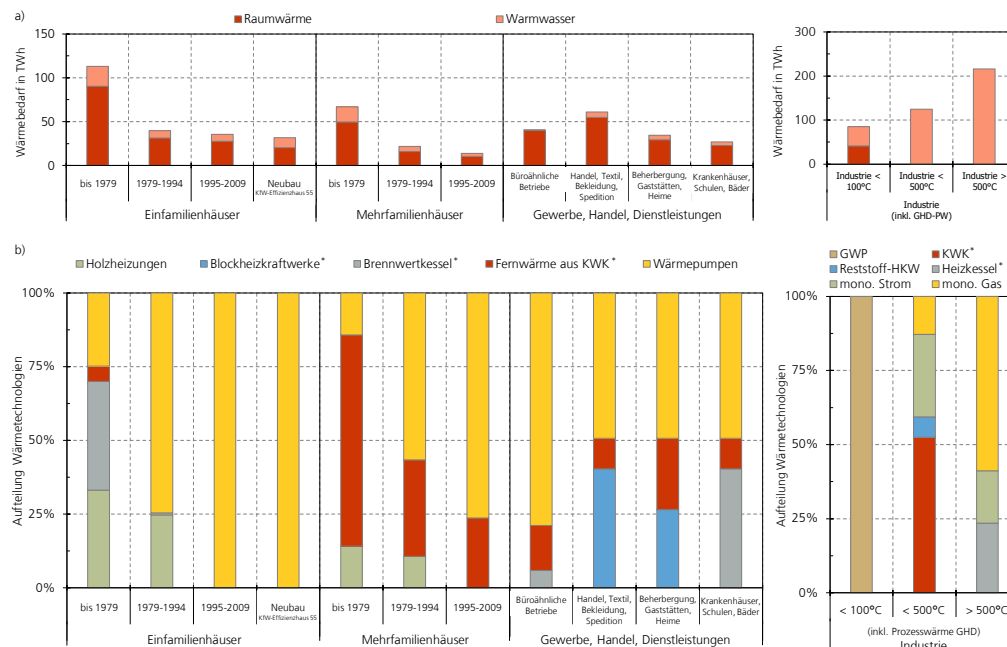


Abbildung 4-1:
Differenzierter
Wärmebedarf und
Technologiezusammen-
setzungen 2050

*) Berücksichtigt eine multivalente Anlagenauslegung (i. W. in Kombination mit elektrischen Heizstäben oder Elektrokesseln)

(IWES et al. 2015)

Für den Stromsektor wird für den herkömmlichen Nettostrombedarf eine Reduktion von 25% für das Jahr 2050 gegenüber 2008 unterstellt (BMWi und BMU 2010), der jedoch keine neuen flexiblen Stromverbraucher, wie beispielsweise die Elektromobilität oder Wärmepumpen, beinhaltet. Die Deckung der Stromnachfrage erfolgt anschließend auf

Basis eines durch das Modell optimierten Anlagenausbaus und -einsatzes erneuerbarer und konventioneller Erzeugungstechnologien.

Als übergreifende Randbedingung wird für das Jahr 2050 das umweltpolitische Ziel einer Treibhausgasreduktion um 80% bezogen auf das Jahr 1990 in den betrachteten europäischen Ländern unterstellt, wobei die Möglichkeit der Lastenteilung (engl. burden sharing) implementiert ist und ebenfalls nicht-energetische Emissionen sowie die Emissionen des internationalen Verkehrs mitberücksichtigt werden.

4.1 Basisszenario

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse der Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung unter der Annahme des bekannten Basisszenarios für den MIV vorgestellt. Untersuchungsfokus sind hierbei die Auswirkungen der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Entwicklungen des MIV und des damit verbundenen mobilitätsbedingten Strombedarfs auf das zukünftige Stromversorgungssystem im Jahr 2050.

Bei der Ergebnisinterpretation gilt es zu berücksichtigen, dass die i. W. kostenbasierte Kraftwerks- und Speicherausbauoptimierung einen integrierten europäischen Strommarkt mit langfristig verlässlichen politischen Rahmenbedingungen unterstellt.

Stromerzeugung und -verbrauch in Europa 2050

In Abbildung 4-2 sind die länderspezifischen Energiebilanzen differenziert nach einzelnen Erzeugungs- und Verbrauchstechnologien für das Basisszenario im Jahr 2050 dargestellt, wobei Deutschland in grau hervorgehoben ist.

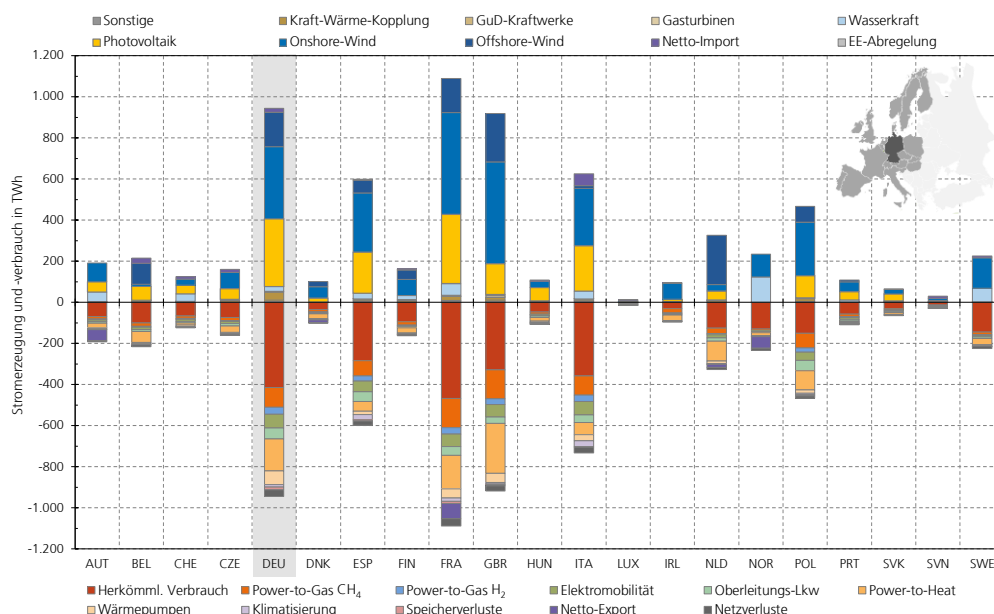


Abbildung 4-2:
Stromezeugung und
-verbrauch des Basisszenarios
in Europa 2050

Im Basisszenario liegt in Deutschland die Nettostromerzeugung bei 944 TWh, was einem Anstieg von 63% gegenüber heute entspricht (2014: 579 TWh). Europaweit liegt der Bedarf an elektrischer Energie bei 6740 TWh.

Der vermehrte Einsatz der Elektromobilität trägt hierbei mit 120 TWh zum Anstieg des Strombedarfs in Deutschland bei, wobei 67 TWh auf den MIV (BEV, PHEV und REEV)

entfallen (siehe ebenfalls Abbildung 3-6) und etwa 53 TWh durch den zukünftigen Einsatz von Oberleitungslastkraftwagen hervorgerufen wird.

Für die Bereitstellung von gasförmigen Stromkraftstoffen werden 96 TWh Strom für die Herstellung von PtG-CH₄ und 33 TWh für PtG-H₂ benötigt. Ein über den Bedarf des Verkehrssektors hinausgehender Ausbau der Power-to-Gas Technologie zur Substitution von fossilen Energieträgern in anderen Sektoren erfolgt hierbei in Deutschland nicht.

Neben dem mobilitätsbedingten Strombedarf sorgt ebenfalls eine verstärkte Nutzung von Strom im Wärmebereich (Wärmepumpen, Power-to-Heat) mit etwa 223 TWh und für Klimatisierung mit 12 TWh für einen weiteren Anstieg.

Zur Einhaltung der unterstellten Treibhausgasreduktion erfolgt die Stromerzeugung erwartungsgemäß zu knapp 90% aus fluktuierenden erneuerbaren Energien und wird hierbei zu 35% durch Photovoltaik- sowie zu 55% durch Windkraftanlagen in Deutschland bereitgestellt.

Installierte Erzeugungskapazitäten in Europa 2050

Die länderspezifischen Erzeugungs- und Speicherleistungen für das Basisszenario im Jahr 2050 sind in Abbildung 4-2a dargestellt. Im Vergleich zu heute steigt die installierte Erzeugungs- und Kraftwerksleistung um etwa 200% in Deutschland deutlich an. Zusätzlich sind die ausgebauten Kurz- und Langzeitspeicherleistungen in Abbildung 4-2b aufgeschlüsselt angegeben.

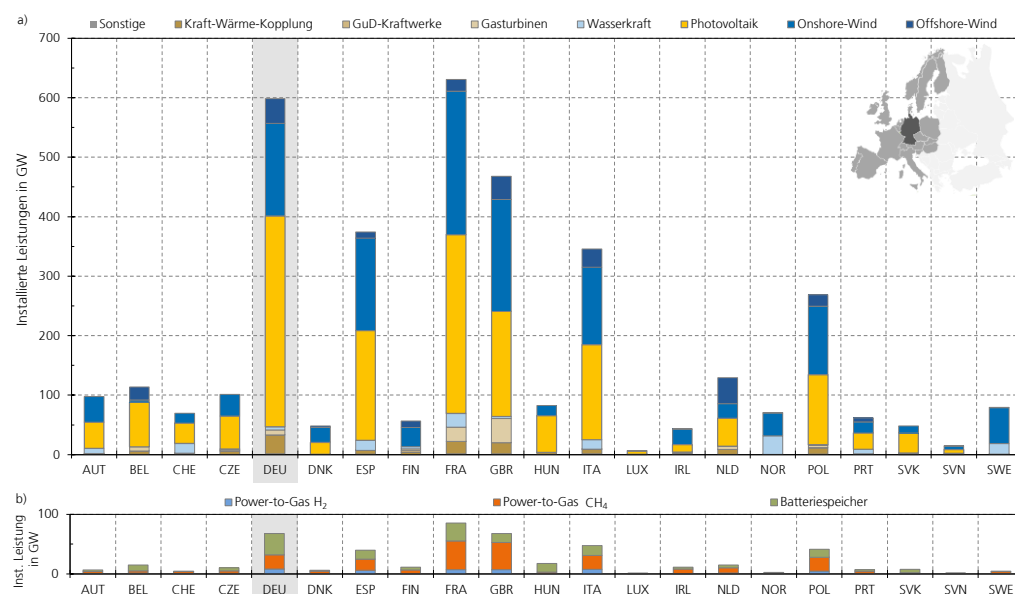


Abbildung 4-3:
Installierte Erzeugungs- und Speicherleistungen des Basisszenarios in Europa 2050

Zur Erreichung des unterstellten Treibhausgasreduktionsziels steigt die Erzeugungsleistung aus fluktuierenden EE im Basisszenario erwartungsgemäß deutlich an und sorgt somit für einen fortschreitenden Umbruch der Erzeugungsstruktur. In Deutschland steigt die installierte Photovoltaikleistung beispielsweise von 40 GW im Jahr 2015 auf langfristig etwa 350 GW bis 2050 und die installierte Windleistung an Land und auf See wächst von heute 44 GW auf etwa 200 GW im identischen Zeitraum (BMWi 2016).

Wie bereits festgestellt, erfolgt in Deutschland ein Ausbau der Power-to-Gas Technologie in der Größenordnung des Bedarfs des motorisierten Individualverkehrs mit insgesamt 32 GW (8 GW PtG-H₂ und 24 GW PtG-CH₄). Zusätzlich werden Batterien als kurzfristige Flexibilitätsoption mit einer Gesamtleistung von etwa 36 GW in Deutschland

ausgebaut. Ein über den Bedarf des Verkehrssektors hinausgehender Ausbau von PtG-Anlagen zur Substitution von Erdgas und weiteren Reduktion von Treibhausgasemissionen erfolgt insbesondere in Ländern mit guten Windstandorten wie beispielsweise Großbritannien, Frankreich oder Dänemark. Die einzelnen länderspezifischen Ausbauleistungen überschreiten hierbei den durch den Verkehrssektor hervorgerufenen Bedarf um bis zu 80%.

4.2 Sensitivitätsanalyse

Aufbauend auf der Analyse des Basisszenarios (Abschnitt 4.1) erfolgt in diesem Abschnitt eine tiefergehende Bewertung der zukünftigen Sektorenkopplung Strom-Verkehr anhand zwei weiterer Szenariovarianten. Für die Annahmen des motorisierten Individualverkehrs werden hierzu die beiden Extremszenarien aus Abschnitt 3.2 (I. Keine CO₂-Steuer und II. Sehr hohe CO₂-Steuer) gewählt und die resultierende Stromerzeugung und der Stromverbrauch in Deutschland und Europa für das Jahr 2050 im Detail untersucht.

Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland und Europa 2050

In Abbildung 4-4 sind die Simulationsergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalyse dargestellt. Hierbei erfolgt für die einzelnen Szenariovarianten für die Darstellung der Stromerzeugung und -verbrauch im Jahr 2050 eine Differenzierung nach Europa und Deutschland.

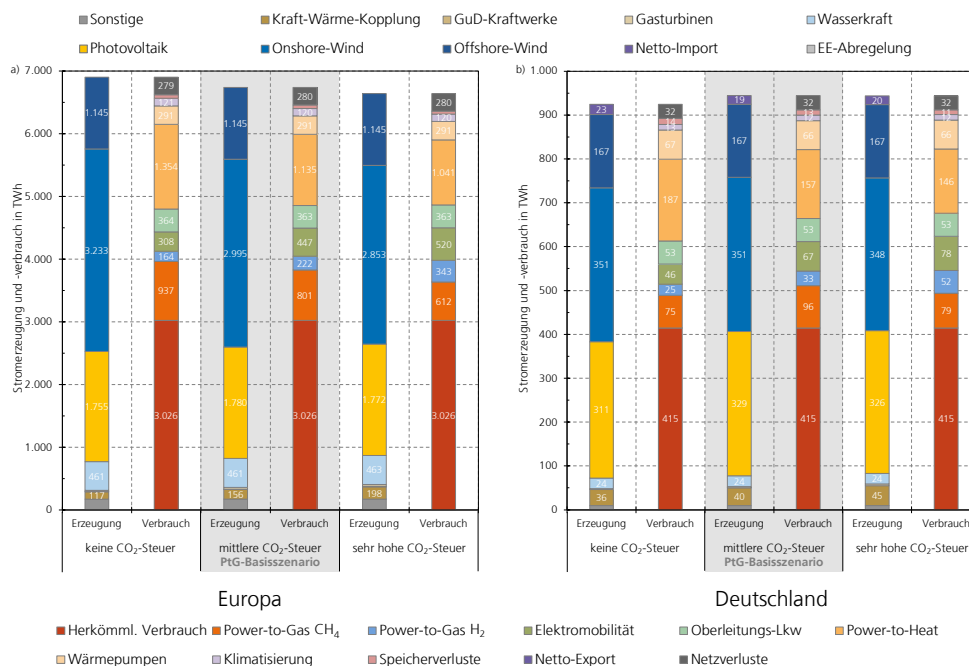


Abbildung 4-4:
Stromerzeugung und
-verbrauch der
Szenariovarianten in Europa
und Deutschland 2050

Für Europa ergibt sich für die betrachteten Szenariovarianten in Abbildung 4-4a ein sinkender Nettostromverbrauch mit steigender CO₂-Besteuerung fossiler Kraftstoffe und entsprechend erhöhter Marktdurchdringung der effizienten Elektromobilität im MIV. Beispielsweise sinkt der Strombedarf um 4% von 6905 TWh auf 6642 TWh zwischen den beiden analysierten Extremszenarien.

Die Ergebnisse für Deutschland zeigen für alle betrachteten Szenariovarianten, trotz sehr unterschiedlichen Eingangsprämissen (siehe Abschnitt 3.2), einen in etwa

vergleichbaren Nettostromverbrauch von 924-944 TWh und eine nahezu gegenläufige Entwicklungstendenz (siehe Abbildung 4-4). Bei einer genaueren Analyse zeigt sich, dass im Vergleich zu Europa außer im Szenario ‚keine CO₂-Steuer‘ kein über den Bedarf des Verkehrssektors hinausgehender PtG-Ausbau in Deutschland erfolgt. D. h. in den beiden anderen Szenariovarianten erfolgt ein für das Gesamtsystem überdimensionierter Einsatz von PtG-CH₄ im Verkehrssektor was entsprechend zu einem erkennbaren Anstieg des Nettostromverbrauchs führt. Gleichzeitig können hierdurch jedoch höhere CO₂-Einsparungen im MIV erzielt werden (siehe Abbildung 3-6).

Aus den beschriebenen Szenarioergebnissen ergibt sich somit weitergehender Forschungsbedarf für eine detaillierte Bewertung des systemrelevanten Ausbaus sowie einer optimierten europa- und weltweiten PtG-Anlagenplatzierung vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung, die über die in diesem Bericht unterstellte 80% Treibhausgasreduktion bis zum Jahr 2050 hinausgeht.

4.3 Power-to-Gas Anlagenstandorte

Power-to-Gas Anlagenstandorte

Die in den Abschnitten 4.1 und 4.2 beschriebenen detaillierten Szenarioanalysen zeigen, dass die zukünftig verstärkte Nutzung von Elektrofahrzeugen aber auch die Bereitstellung von erneuerbaren gasförmigen Kraftstoffen mit Hilfe der PtG-Technologie langfristig eine stärkere Kopplung des Strom- und Verkehrssektors erfordern. Im analysierten Basisszenario (Abschnitt 4.1) ergibt sich beispielsweise langfristig eine mobilitätsbedingte PtG-Anlagenleistung in Höhe von etwa 24 GW für die Herstellung von 59 TWh erneuerbarem Methan in Deutschland im Jahr 2050.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage der systemdienlichen regionalen Verteilung der einzelnen Anlagen, insbesondere in Bezug auf eine Bewertung des gewählten Anlagenstandorts der im Rahmen von WOMBAT errichteten 6,3 MW PtG-Anlage in Werlte im Netzgebiet der EWE. Hierzu ist in Abbildung 4-5 die netzseitig optimierte räumliche Verteilung von Power-to-Anlagen in Deutschland differenziert nach den Dena-Stromnetzregionen für ein Stromversorgungsszenario mit einem EE-Anteil von 85% dargestellt. Hervorgehoben ist die Netzregion 22, die zu großen Teilen dem EWE-Netzgebiet entspricht (siehe hierzu ebenfalls Abbildung 4-7). In Abhängigkeit von der zu installierenden PtG-Leistung entfallen auf Grundlage der netzseitig optimierten räumlichen Anlagenverteilung zwischen 52% bis 90% auf die EWE-Netzregion.

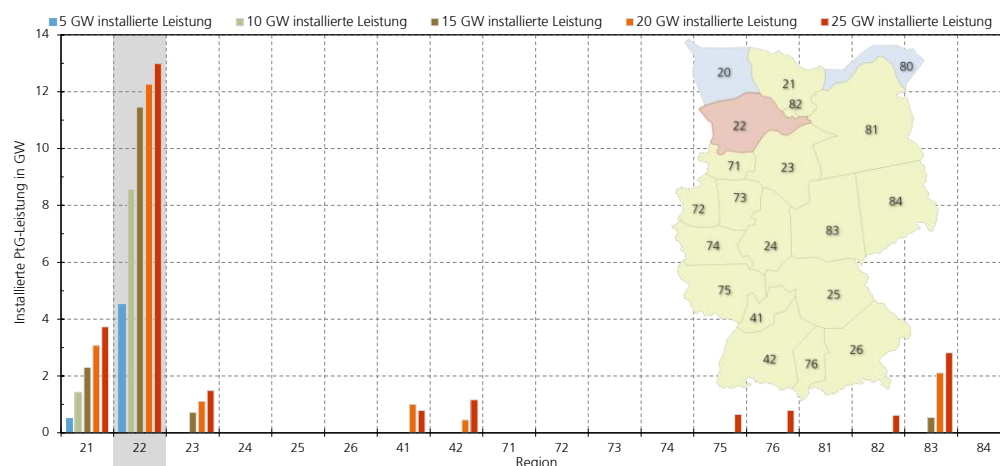


Abbildung 4-5:
Netzseitig optimierte
räumliche Power-to-Gas
Anlagenverteilung in
Deutschland

Eigene Darstellung auf Basis von
(Jentsch 2014; Jentsch et al. 2014)

Aus der regional optimierten PtG-Anlagenverteilung auf Grundlage des Übertragungsnetzes in Abbildung 4-5 ergeben sich ebenfalls Rückwirkungen auf die Gasinfrastruktur. Zu diesem Zweck ist in Abbildung 4-6 der für das analysierte Basisszenario ermittelte deutschlandweite Speicherfüllstand dargestellt, der sich auf Grundlage der ermittelten PtG-Erzeugung und dem hinterlegten Methanverbrauch für den MIV ergibt. Hierbei zeigt sich ein typischer saisonaler Speicherungsverlauf mit einer insgesamt notwendigen Speicherkapazität von 14 TWh für Deutschland.

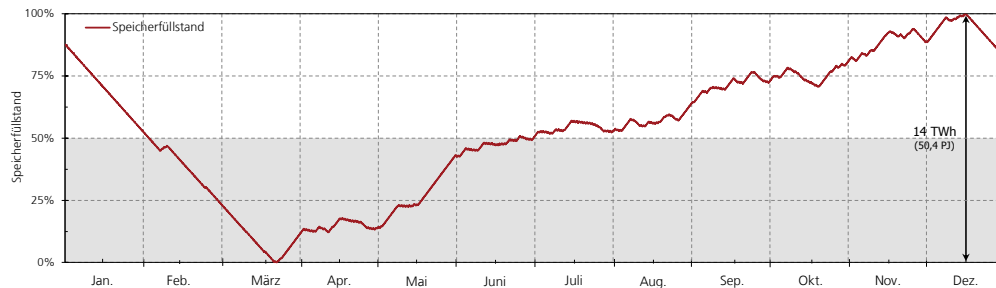


Abbildung 4-6:
Speicherfüllstand auf Grundlage der PtG-Erzeugung und des Methanverbrauchs im Basisszenario in Deutschland

Auswertung Übertragungsnetzknoten im EWE-Netzgebiet

Auf Basis der beschriebenen prinzipiellen Eignung der EWE-Netzregion für zukünftige PtG-Anlagen erfolgen in diesem Abschnitt weitergehende Analysen ausgewählter Übertragungsnetzknoten als potenzielle Anlagenstandorte für das in Abschnitt 4.1 beschriebene zukünftige Energieversorgungssystem.

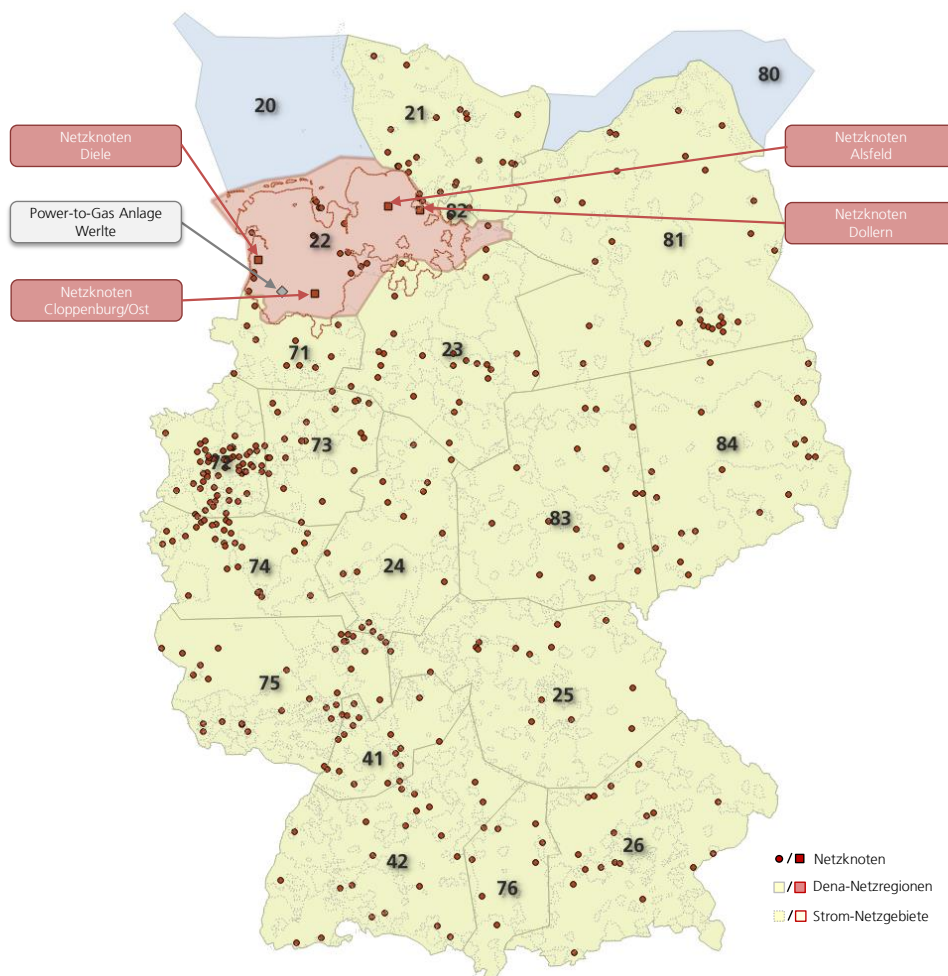


Abbildung 4-7:
Dena-Netzregionen und Stromnetzgebiete sowie Übertragungsnetzknoten in Deutschland

Zur besseren Übersicht erfolgt in Abbildung 4-7 zunächst eine Darstellung der Denanetzregionen und Übertragungsnetzknoten in Deutschland, wobei das relevante EWE-Netzgebiet hervorgehoben ist. Zusätzlich ist der Anlagenstandort der PtG-Anlage in Werlte und die für die weiteren Analysen ausgewählten Übertragungsnetzknoten mit eingezeichnet. Hierbei werden zwei Netzknoten mit Anlandungspunkt von Offshore-Trassen (Diele und Cloppenburg/Ost) sowie zwei weitere Netzknoten (Alsfeld und Dollern) im EWE-Netzgebiet für das Jahr 2050 untersucht.

Die Residuallastauswertungen der entsprechenden Netzknoten auf Grundlage des EE-Ausbaus des Basisszenarios sind für das Jahr 2050 in Abbildung 4-8 dargestellt. Insgesamt zeigt sich hierbei eine signifikante Einspeisung aus fluktuierender Windkraft an allen Netzknoten, die in 7800-8300 Stunden des Jahres zu einer deutlich negativen Residuallast führt und somit die Notwendigkeit des Stromtransports oder regionaler Speicherung verdeutlicht.

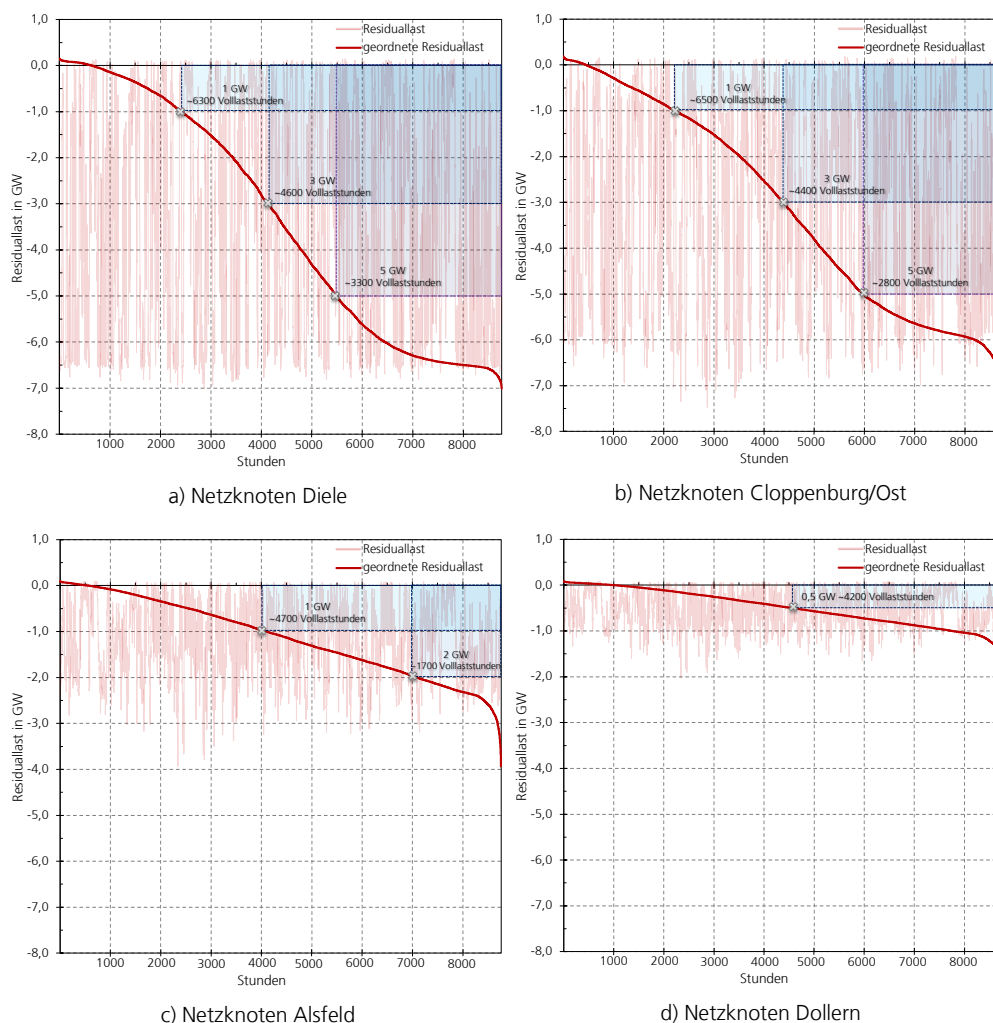


Abbildung 4-8:
Auswertung exemplarischer
Netzknoten des
Übertragungsnetzes im
EWE-Netzgebiet 2050

Neben den geordneten Residuallastlinien sind ebenfalls für beispielhafte installierte PtG-Leistungen die theoretisch erzielbaren Volllaststunden an den jeweiligen Netzknoten mit angegeben. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, wird für die Berechnung der Bereitstellungskosten von PtG-Methan für den MIV im Jahr 2050 eine Anlagenauslastung von 4000 Stunden im Jahr unterstellt. Unter dieser getroffenen Annahme ließen sich an den beiden Netzknoten mit Offshore-Trassenanbindung (Abbildung 4-8a und b) etwa 7,5 GW der erforderlichen 24 GW PtG-Leistung im

Basisszenario installieren. Aber auch die beiden weiteren Netzknoten sind durch hohe negative Residuallasten geprägt, sodass eine lokale Verwertung von Überschussleistungen durch Speicher bzw. die Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen an diesen Standorten möglich ist.

Neben den erforderlichen Ausbauleistungen der erneuerbaren Energien bedarf es für einen PtG-Einsatz im Industriemaßstab ebenfalls einer entsprechenden Gasinfrastruktur zum Transport und zur Speicherung des erzeugten Methans. In Deutschland existieren hierfür bereits heute 23,8 Mrd. m³ (etwa 262 TWh)⁶ Speichervolumen für Gas (Sternier et al. 2015). Aufgrund der vorteilhaften geologischen Gegebenheiten existieren u. a. im Norden von Deutschland und somit ebenfalls im EWE-Netzgebiet eine Vielzahl an Kavernenspeicher in direkter räumlicher Nähe zur Windenergieeinspeisung.

Neben der beschriebenen Verfügbarkeit an erneuerbaren Ressourcen und Speicherkapazitäten der Gasinfrastruktur im EWE-Netzgebiet erfordert die Herstellung von PtG-Methan ebenfalls Kohlenstoffdioxid. Hierbei sind insbesondere biogene CO₂-Bezugsquellen vorteilhaft, da diese u. a. als klimaneutral gegenüber der Atmosphäre angesehen werden können und mitunter hohe CO₂-Konzentrationen aufweisen. In diesem Zusammenhang zeigen die Analysen von (Trost et al. 2012), dass neben einer direkten Methanisierung von Biogas ebenfalls Biogasanlagen mit Einspeisung ins Erdgasnetz, wie die gewählte Anlagenkombination in Werlte, besonders geeignet sind. Die heutige regionale Verteilung von Biogasanlagen in Deutschland weist hierbei eine hohe Konzentration für Bayern und Schleswig-Holstein sowie Niedersachsen auf, sodass Biogasanlagen im EWE-Netzgebiet aussichtsreiche CO₂-Mengen zur Verfügung stellen können.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Analysen einer systemdienlichen regionalen Verteilung von zukünftigen Power-to-Gas Anlagen, dass insbesondere das Netzgebiet der EWE aufgrund hoher zu erwartender Ausbauleistungen erneuerbarer Energien (i. W. Windkraft an Land und auf See), verfügbarer Gastransport- und Gasspeicherkapazitäten sowie nennenswerter Potenziale an biogenen CO₂-Quellen für einen zukünftigen PtG-Ausbau geeignet erscheint.⁷

⁶ Angabe zum Speichervolumen bezieht sich auf den oberen Heizwert von Methan.

⁷ Ergänzend zu der beschriebenen zukünftigen systemdienlichen regionalen Verteilung von PtG-Anlagen auf Basis des Übertragungsnetzes und lokaler Gasspeicherkapazitäten bietet (Kurt et al. 2014) neben einer Beschreibung der umgesetzten technischen Anlagenkombination aus Power-to-Gas und Biogaseinspeisanlage in Werlte weitergehende Analysen zu Auswirkungen auf die lokalen Strom- und Gasnetze.

5 Schlussfolgerungen

Die Analysen zur zukünftigen Entwicklung des Fahrzeugbestands im motorisierten Individualverkehr haben gezeigt, dass eine stärkere Diversifikation der Antriebskonzepte und Energieträgerbasis zu erwarten ist. Jedoch bleibt der konventionelle Verbrennungsmotor kurz- bis mittelfristig aufgrund zu erwartender Effizienzsteigerungen, einer Erweiterung der Energieträgerbasis um Erdgas sowie einer verstärkten Hybridisierung des Antriebsstrangs dominierend.

Bedingt durch zukünftig kontinuierlich sinkende Batteriekosten, weiter voranschreitender Technologieentwicklung und einem verstärktem Infrastrukturausbau erfolgt mittelfristig eine erfolgreiche Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen. Deren Entwicklung ist bis etwa 2030 insbesondere durch Hybridkonzepte mit Möglichkeit der externen Batterieladung (PHEV und REEV) geprägt. Langfristig sind mit zunehmender Wettbewerbsfähigkeit jedoch rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) der bevorzugte Fahrzeugantrieb im MIV.

Neben einem Markthochlauf der Elektromobilität ist die kurz- bis mittelfristige Fahrzeugbestandsentwicklung insbesondere durch Erdgasfahrzeuge (ICE und HEV) geprägt, die bei Erreichung der Wettbewerbsfähigkeit von PtG langfristig zu gewissen Teilen durch erneuerbares Methan und Wasserstoff als erneuerbare Kraftstoffoptionen abgelöst werden. In den analysierten Szenariovarianten liegt die langfristige Nachfrage an PtG-Methan im MIV im Jahr 2050 beispielsweise zwischen 28 und 59 TWh. Die Erreichung der Kostenparität erfordert jedoch günstige Rahmenbedingungen für die PtG-Technologie und setzt u. a. ambitionierte Kostendegressionen der Anlagentechnik sowie günstige Strombezugpreise (z. B. Umlagebefreiung) für einen dynamischen Anlagenbetrieb und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen voraus.

Darüber hinaus hat sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass eine emissionsabhängige Besteuerung fossiler Kraftstoffe dazu beitragen kann, elektrische Antriebskonzepte sowie erneuerbare gasförmige Stromkraftstoffe schneller und im größeren Umfang im Fahrzeugbestand zu etablieren. Zusätzlich bietet das Instrument der CO₂-Besteuerung die Möglichkeit, negative externe Umwelteffekte verursachungsgerecht zu internalisieren. Bei einer ambitionierten Besteuerung kann hierdurch der Endenergiebedarf sowie insbesondere die CO₂-Emissionen im MIV gegenüber heute nochmals deutlich reduziert werden.

Die zentralen Ergebnisse der Kraftwerks- und Speicherausbauroptimierung zeigen zukünftig eine verstärkte Sektorenkopplung und damit verbunden einen deutlichen Anstieg der Nettostromerzeugung. Diese wird unter anderem zur Deckung des zusätzlichen direkten und indirekten Strombedarfs für die Elektromobilität sowie für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mit Hilfe der PtG-Technologie genutzt. Zusätzlich erfolgt europaweit in Ländern mit vorteilhaften Standortfaktoren für die Windenergie ein darüber hinausgehender PtG-Ausbau als saisonale Speicheroption und zur Substitution von Erdgas in den anderen Sektoren.

Darüber hinaus haben die separaten PtG-Auswertungen für Deutschland und Europa weitergehenden Forschungsbedarf aufgezeigt, um eine detailliertere Bewertung der europa- und ggf. weltweiten PtG-Anlagenplatzierung sowie des insgesamt erforderlichen PtG-Ausbaus vorzunehmen. Insbesondere vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung, die über die in diesem Bericht unterstellte 80%

Treibhausgasreduktion bis zum Jahr 2050 deutlich hinausgeht, stellt sich die Frage des erforderlichen sektorenübergreifenden Bedarfs an Power-to-X.

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Analysen einer systemdienlichen regionalen Verteilung von zukünftigen Power-to-Gas Anlagen in Deutschland machen deutlich, dass insbesondere das Netzgebiet der EWE aufgrund hoher zu erwartender Ausbauleistungen erneuerbarer Energien (i. W. Windkraft an Land und auf See), verfügbarer Gastransport- und Gasspeicherkapazitäten sowie nennenswerter Potenziale an biogenen CO₂-Quellen für einen zukünftigen PtG-Ausbau besonders geeignet erscheint.

6 Literaturverzeichnis

- ADAC 2015 ADAC E.V.: *Autodaten & Autokosten : Autodatenbank*. URL <http://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/default.aspx>. – Stand: 23.10.15
- Agora 2014 AGORA ENERGIEWENDE: *Stromspeicher in der Energiewende : Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz*. Berlin, 2014
- AGEB 2016 ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2015*. Berlin und Köln, 2016
- Blesl et al. 2009 BLES, M., et al.: *Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität*. Stuttgart, 2009
- Blunden, Arndt 2016 BLUNDEN, J. (Hrsg.); ARNDT, D. S. (Hrsg.): *State of the Climate in 2015 : Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society* Vol. 97, No. 8, 2016
- BMWi und BMU 2010 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin, 2010
- BMWi 2016 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) : (Stand: August 2013)*. Berlin, 2016
- BDEW 2014 BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014 : Haushalte und Industrie*. Berlin, 2014
- Cambridge Econometrics, Ricardo-AEA 2013 CAMBRIDGE ECONOMETRICS ; RICARDO-AEA: *An Economic Assessment of Low Carbon Vehicles*. Cambridge und London, 2013
- Deutsche Bundesregierung 2009 DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*. Berlin, 2009
- Dena 2012 DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR: *Verkehr. Energie. Klima : Alles Wichtige auf einen Blick*. Berlin, 2012
- DVGW 2013 DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V.: *Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz*. Bonn, 2013
- Ernst et al. 2014 ERNST, C.-S., et al.: *CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020*. Aachen, 2014
- Hermann et al. 2014 HERMANN, H., et al.: *Ausweitung des Emissionshandels auf Kleinemittenten im Gebäude- und Verkehrssektor : Gestaltung und Konzepte für einen Policy mix*. Dessau-Roßlau, 2014
- Hill et al. 2012 HILL, N., et al.: *A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050*. Didcot, 2012
- Hülsmann et al. 2014 HÜLSMANN, F., et al.: *Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050*. Öko-Institut Working Paper 3/2014, 2014
- IWES 2015 FRAUNHOFER IWES: *SCOPE : Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems*. Kassel, 2015
- IWES et al. 2015 FRAUNHOFER IWES ; FRAUNHOFER IBP ; IFEU - INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH ; STIFTUNG UMWELTENERGIERECHT: *Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr*. Kassel, Heidelberg, Würzburg, 2015

IWES 2016	FRAUNHOFER IWES: <i>Abschlussbericht WOMBAT-ESP : Wirkungsgrad-Optimierung von Methanisierungs- und Biogasanlagen-Technologie im Rahmen eines EE-Speicherungs-Pilotprojektes</i> . Kassel, 2016
Jentsch 2014	JENTSCH, M.: <i>Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern : Modellbasierte Analyse des markt- und netzseitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem</i> . Universität Kassel. Dissertation. Kassel, 2014
Jentsch et al. 2014	JENTSCH, M., et al.: <i>Optimal Use of Power-to-Gas Energy Storage Systems in an 85% Renewable Energy Scenario</i> . In: <i>Energy Procedia</i> (2014), Nr. 46, S. 254–261
Kurt et al. 2014	KURT, O., et al.: <i>Das e-gas-Projekt am Biogasanlagenstandort Werlte : Auswirkungen für die Strom- und Gasnetze der EWE Netz GmbH</i> . In: <i>gwf - Gas+Erdgas</i> 155 (2014), Nr. 5, S. 304–309
McKinsey & Company 2010	MCKINSEY & COMPANY: <i>A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis : The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles</i> , 2010
MWV 2014	MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V.: <i>MWV-Jahresbericht 2013 / Mineralöl-Zahlen</i> . Berlin, 2014
Mock 2010	MOCK, P.: <i>Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)</i> . Universität Stuttgart. Dissertation. Stuttgart, 2010
Schlesinger et al. 2014	SCHLESINGER, M., et al.: <i>Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose</i> . Basel, Köln, Osnabrück, 2014
Smokers et al. 2011	SMOKERS, R., et al.: <i>Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars</i> . Delft, 2011
Sterner et al. 2015	STERNER, M., et al.: <i>Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland</i> . Regensburg, Hamburg, Berlin, 2015
Trost et al. 2012	TROST, T., et al.: <i>Erneuerbares Methan: Analyse der CO₂-Potenziale für Power-to-Gas Anlagen in Deutschland. Erneuerbare Energien im Gasnetz speichern</i> . In: <i>Zeitschrift für Energiewirtschaft</i> 36 (2012), Nr. 3, S. 173–190
Trost 2016	TROST, T.: <i>Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr : Modellgestützte Szenarioanalyse der Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem</i> . Universität Leipzig. Dissertation. Leipzig, 2016
UNFCCC 2015	UNFCCC. CONFERENCE OF THE PARTIES (COP): <i>Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President</i> . Genf, 2015
von Oehsen 2012	VON OEHSEN, A.: <i>Entwicklung und Anwendung einer Kraftwerks- und Speichereinsatzoptimierung für die Untersuchung von Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland</i> . Universität Kassel. Dissertation. Kassel, 2012