

1 Einleitung

1.1 Gegenstand der Arbeit

Das Auto hat für die meisten Menschen einen hohen Stellenwert. Drei Viertel aller deutschen Haushalte besitzen mindestens einen PKW¹. Egal ob privat oder beruflich, niemand ist in der heutigen dynamischen Welt dazu bereit, auf seine individuelle Mobilität zu verzichten.

Um diese Mobilität auch in Zukunft zu gewährleisten, ist es von entscheidender Bedeutung, eine Lösung zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und eine Alternative zu den sich verknappenden fossilen Brennstoffen zu finden. Als eine Möglichkeit zur Sicherung zukünftiger und vor allem nachhaltiger Mobilität wird die Elektromobilität, also die Nutzung elektrischer Energie bei Fahrzeugantrieben, inkl. Hybridantrieben, als Brückentechnologie, gesehen. War die Elektromobilität einst eine große Zukunftsvision, hat sie sich bis heute zu einem wichtigen und international hart umkämpften Markt entwickelt.

In der Diskussion um Treibhausgasemissionen hat die deutsche Automobilindustrie mit ihren weitreichenden und gesetzüberschreitenden Optimierungen im Bereich des Dieselmotors, der Motorensteuerung, etc. das Thema Elektromobilität in den Mittelpunkt gerückt. Der Aufstieg eines Unternehmens wie Tesla wäre ohne diese Kreativität, die radikalen Maßnahmen der Regulierungsbehörden und dem daraus resultierenden Mentalitätswechsel der Menschen, hin zu alternativen Antrieben, nicht möglich. Da jedoch nicht nur die Mobilitätswende einen starken Fokus und eine starke Hinwendung hin zu Antrieben mit elektrischer Energie erfährt, sondern auch die generelle deutsche Energiewende einen exponentiellen Aufschwung nach dem Fukushima Unglück 2011 erfahren hat, sind die deutschen elektrischen Versorgungsnetze nicht in gleichem Maße im Fokus gewesen. Somit können die Netze die gleichzeitige Fokussierung auf Energiewende und Mobilitätswende nicht verkraften.

Wenn also die Mobilitätswende und auch die Energiewende erfolgreich gestaltet werden sollen, ist ein Ausbau der Netze unabdingbar, um die von den Bürgern gewohnte und geforderte Versorgungssicherheit und Netzstabilität nachhaltig zu gewährleisten. Es muss sichergestellt sein, dass die ansteigende Anzahl an zugelassenen Elektrofahrzeu-

¹ Statistisches Bundesamt (2020).

gen, mit ausreichend, sprich zusätzlicher, zu der bereits für das Alltagsleben benötigen Energie, versorgt werden. Um dies unter ökonomischen Aspekten sinnvoll zu gestalten, muss der Ladeinfrastrukturaufbau, der Netzausbau und die Kundenbefriedigung unter kapitalwertorientierten Aspekten optimiert werden.

Dazu wird in der vorliegenden Arbeit ein Entscheidungsmodell entwickelt, welches es ermöglichen soll, einen Ladeinfrastrukturaufbau und Betrieb unter Beachtung der Restriktionen des elektrischen Versorgungsnetzes und der Anwendung einer Kapitalwertberechnung zu ermöglichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Das zweite Kapitel führt in die Elektromobilität und Ladeinfrastrukturplanung ein. Dabei wird die Energiewende, sowie der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität (NEE) dargestellt. Die Rahmenbedingungen werden über vier Dimensionen, ökonomisch, politisch-rechtlich, verkehrstechnisch und energietechnisch, aufgespannt. Auch wird das derzeitige Akzeptanzproblem der Elektromobilität beleuchtet.

In dem Kapitel drei erfolgt die Problemkennzeichnung. Im ersten Schritt wird das Entscheidungsproblem in seinen vier Dimensionen aufgezeigt. Die vier Dimensionen leiten sich aus den Ausführungen des zweiten Kapitels ab. Im zweiten Schritt werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Entscheidungsmodell beschrieben. Am Ende des Kapitels wird gezeigt, wie die einzelnen Anforderungen schrittweise in dem Entscheidungsmodell entwickelt werden.

Die modelltheoretischen Grundlagen werden in dem vierten Kapitel aufbereitet. Dazu wird zunächst knapp die historische Entwicklung der flussbasierten Standortplanung aufgezeigt. Darauf aufbauend wird das Flow-Refueling Location Model (FRLM) eingeführt, welches die Ausgangsbasis für die Modellentwicklung in den folgenden Kapiteln vier und fünf darstellt. Das Kapitel vier schließt mit einer Literaturübersicht und dem Aufzeigen der Forschungslücke.

Um die Entscheidungsunterstützung bei der Ladeinfrastrukturplanung für Elektrofahrzeuge zu gewährleisten, wird in den Kapiteln fünf und sechs ein formal-mathematisches Entscheidungsmodell in drei, aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen entwickelt. Die Entwicklung verläuft in der ersten Stufe, über die Integration von Ausbaustufen im elektrischen Versorgungsnetz in das Ausgangsmodell der flussbasierten Standortplanung, dem FRLM, hin zum Flow-Refueling Location Model with Capacity Con-

straints and Extension Stages (FRLM-CC-ES). Die zweite, evolutionäre Modellstufe überführt die erste Stufe in die Mehrperiodigkeit und dynamisiert die Nachfrage, so dass das Entscheidungsmodell als Multi-Period Flow-Refueling Location Model with Capacity Constraints and Extension Stages (M-FRLM-CC-ES) deklariert wird.

Das Kapitel sechs führt die Entwicklung in der dritten Modellstufe zu Ende, indem eine Investitionsrechnung in das Entscheidungsmodell integriert wird, um den Ladeinfrastrukturausbau ökonomisch zu bewerten und mit einer Gewinnorientierung zu betreiben. Die dritte Modellstufe ist als Multi-Period Flow-Refueling Location Model with Capacity Constraints and Extension Stages with an Investment Appraisal (M-FRLM-CC-ES-IA) betitelt.

Die Validierung des entwickelten Entscheidungsmodells ist Gegenstand von dem Kapitel sieben. Dazu wird eine Fallstudie, die auf realen Daten des Kraftfahrt Bundesamtes (KBA) und der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) basiert, entwickelt und mit dem Entscheidungsmodell berechnet. Auf Basis der Ergebnisse wird das Entscheidungsmodell beurteilt und es werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und einem Ausblick in dem Kapitel sieben.

2 Einflussfaktoren auf die Ladeinfrastrukturplanung in Deutschland

2.1 Die deutsche Energiewende als Treiber der Elektromobilität

Die deutsche Energiewende, beschleunigt durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima im März 2011, ist in der Phase der realen Umsetzung angekommen.² Sie umfasst die vollständige Transformation des deutschen Energiesystems. Ziel ist es, den Wandel weg von einer kohlenstoffbasierten hin zu einer nachhaltigen, regenerativen Energieversorgung zu vollziehen.³ Die vorliegende Arbeit fokussiert das Thema Ladeinfrastrukturplanung für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Der Fokus auf Deutschland ist darin begründet, dass die Arbeit in Deutschland verfasst wurde, und die Situation und die bestimmenden Faktoren für den Autor am besten einsehbar waren.

Innerhalb der Energiewende stellt die Elektromobilität aus Sicht der Bundesregierung einen zentralen Baustein dar.⁴ Das Ziel, im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge (EV) zu betreiben und dadurch die zukünftige Mobilität "klima- und umweltfreundlicher, ressourcenschonender und wettbewerbsfähiger" zu gestalten, wurde jedoch verfehlt.⁵ Mit Blick auf einen längerfristigen Zeithorizont sind bis zum Jahr 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge und bis 2050 27 Millionen Elektrofahrzeuge aus Sicht der Bundesregierung geplant.⁶

Insbesondere, um die klimapolitischen Ziele im Hinblick auf die Reduktion der CO₂-Emissionen zu erreichen, ist eine erfolgreiche Etablierung der Elektromobilität unabdingbar. Sektorübergreifend besteht in Deutschland das Ziel, die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 40 % zu senken. Der Verkehrssektor, der 28 % des gesamten Energieverbrauchs und ca. 20 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verursacht, ist von diesen Zielvorgaben jedoch weit entfernt.⁷ Um die Ziele der Energiewende - reduzierte CO₂-Emissionen und eine höhere Energieeffizienz - zu erreichen, ist eine Integration von Elektrofahrzeugen in den Verkehrssektor vorteilhaft.

² Vgl. Bozem et al. (2013), S. 5.

³ Vgl. Maubach (2014), S. 1.

⁴ Vgl. BMWi (2018).

⁵ Vgl. BMWi (2019).

⁶ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2011), S. 34.

⁷ Vgl. Radtke und Canzler (2020), S. 195.

Die derzeitige Struktur und Leistungsfähigkeit der elektrischen Versorgungsnetze sind noch auf die Zeit vor der Energiewende ausgelegt. Die Energieversorgung und -nutzung verändern sich mit der Energiewende jedoch grundlegend. Im Zuge der Energiewende stellen die zunehmende dezentrale Stromerzeugung und die immer höher fluktuierende Strommenge, bedingt durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und das Laden von Elektrofahrzeugen, neuartige Lasten für die elektrischen Versorgungsnetze dar.⁸

Die Last, welche entsteht, wenn EVs geladen werden, tritt fast ausschließlich in den Niederspannungsnetzen auf. Daher ist es unabdingbar, die Niederspannungsnetze auszubauen, um eine erfolgreiche Energiewende zu gestalten und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.⁹

2.2 Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität

Die Bundesregierung plant, in Deutschland einen Massenmarkt für Elektrofahrzeuge zu etablieren.¹⁰ Bis 2009 gab es keinen ganzheitlichen Ansatz für eine erfolgreiche Entwicklung und Einführung der Elektromobilität. Am 19. August 2009 wurde von der Bundesregierung der "Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität" (NEE) veröffentlicht. Hauptziele dieses Entwicklungsplans waren die Forschung und Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von elektrischen Fahrzeugen, sowie die Marktführerschaft im Bereich der Elektromobilität Deutschlands. Gleichzeitig sollte die deutsche Industrie und Wissenschaft eine Vorreiterrolle auf dem Weg zur Gestaltung eines nachhaltigen Mobilitätsmarktes einnehmen.¹¹ Um eine effektive Steuerung der Zielerreichung des NEE zu gewährleisten, wurde im Jahr 2010 die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) als Beratungsgremium für die Bundesregierung und die zuständigen Bundesministerien geschaffen. In der NPE vertreten waren Abgesandte aus Politik, Industrie und Wissenschaft, um gemeinsam Strategien zu entwickeln, Deutschland zum Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität und elektromobile Dienstleistungen zu formen.¹²

Die im NEE definierten Ziele waren in die drei Kategorien "ökonomische Anforderungen, Rahmenbedingungen und Restriktionen", "politische Anforderungen, Rahmenbedingungen und Restriktionen" und "technische Anforderungen, Rahmenbedingungen

⁸ Vgl. Bührke und Wengenmayr (2011), S. 119.

⁹ Vgl. Schulz (2015), S. 175.

¹⁰ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2011), S. 12.

¹¹ Vgl. Die Bundesregierung (2009), S. 2.

¹² Vgl. Die Bundesregierung (2009), S. 2.

und Restriktionen¹³ unterteilt.¹³ Die Abbildung 2-1 stellt die drei Kategorien dar. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt in dem Kapitel 2.4.

Ökonomische Anforderungen & Rahmenbedingungen	Politisch-rechtliche Anforderungen & Rahmenbedingungen	Technische Anforderungen & Rahmenbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung innovativer Mobilitätskonzepte • Entwicklung und Implementierung von Anreizsystemen zur Kaufstimulierung • Entwicklung nachhaltiger und ökonomisch tragfähiger Geschäftsmodelle für den Betrieb von Ladeinfrastrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltung des ordnungs-politischen Rahmens über: <ul style="list-style-type: none"> • Etablierung von Sicherheitsstandards • Normung von Schnittstellen • Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt und Leitanbieter in der Elektromobilität 	<p>verkehrstechnisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Ladeinfrastrukturen • 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen bis 2020 <p>energetechnisch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einbindung E-mobilität in das elektrische Versorgungsnetz • F&E im Bereich Li-Ionen Batterien 3. & 4. Generation

Abbildung 2-1: Gestaltungsrahmen des NEE

Quelle: Eigene Darstellung an Anlehnung an Link (2012), S. 27.

Der Schwerpunkt der Arbeit der NPE lag darin, die Gestaltung der Rahmenbedingungen zu koordinieren und einen aktiven Dialog zwischen den einzelnen Interessensgruppen voranzubringen. Ein wichtiges Instrument der NPE waren ihre Fortschrittsberichte, in denen die NPE analysiert hat, ob die benötigten Rahmenbedingungen geschaffen wurden. Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, an welcher Stelle weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf bestand und inwieweit Normungen und Standardisierungen sinnvoll verwirklicht waren. Weiterhin beurteilte die NPE die realisierte und zukünftig erwartete Marktentwicklung.

In ihrem Fortschrittsbericht von 2014 folgerte die NPE, dass bei fehlenden Anreizen die Anzahl von einer Million EVs im Jahr 2020 verfehlt würde. Bei entsprechenden Maßnahmen, insbesondere dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und der Bewilligung finanzieller Förderungen für EVs hätte das Ziel allerdings erreicht werden können.¹⁴ Damit die Elektromobilität ihre geforderte Funktion, die Energiewende aktiv mitzugestalten, erfüllen kann, muss eine öffentliche und barrierefreie Ladeinfrastruktur geschaffen werden.¹⁵

¹³ Vgl. Link (2012), S. 27.

¹⁴ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2014), S. 48.

¹⁵ Vgl. BMWI (2020).

Diese ist Voraussetzung, dass potentielle Käufer der Technologie der EVs und den zu errichtenden Ladeinfrastrukturen vertrauen.

Die Entwicklung Deutschlands zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität sollte nach den Vorschlägen der NPE in drei Phasen erfolgen. Die Schwerpunkte der Phasen waren unterschiedlich ausgestaltet und gewichtet. In der Abbildung 2-2 sind die drei geplanten Phasen dargestellt.

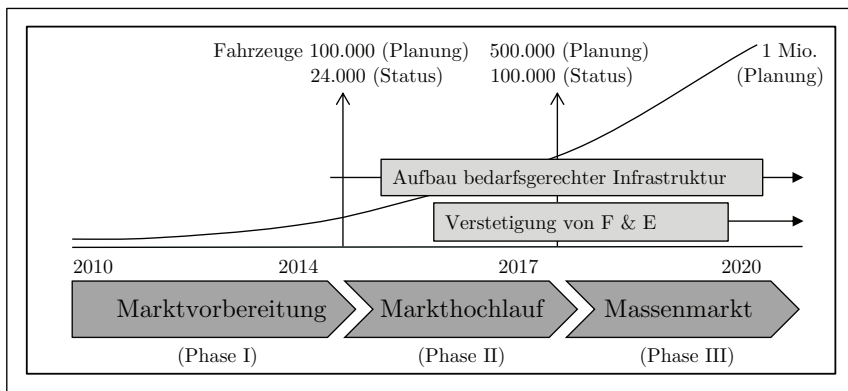


Abbildung 2-2: Entwicklungsphasen Elektromobilität

Quelle: Eigene Darstellung an Anlehnung an NPE (2014), s. 15.

Die Marktvorbereitungsphase vom Jahr 2010 bis Ende 2014 legte den Schwerpunkt auf Forschung & Entwicklung sowie der Einrichtung von wenigen, großen Schaufensterprojekten. Diese Schaufensterprojekte dienten als Realversuche der ersten wissenschaftlichen Erkenntnisse der NPE. Die zweite Phase bis zum Ende des Jahres 2017 wurde als Markthochlaufphase benannt. Der Fokus lag auf dem Marktaufbau bei EVs und der Ladeinfrastruktur. Die Etablierung von 500.000 Elektrofahrzeugen in der Markthochlaufphase hätte dabei nur mit einer öffentlichen, bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur erreicht werden können.^{16,17} Nach den Vorstellungen der NPE sollte in der zweiten Phase eine flächendeckende Optimierung der Standortwahl von öffentlicher Ladeinfrastruktur in einzelnen Modellregionen durchgeführt werden. Fokus sollte dabei auf der Integration der Ladeinfrastruktur in das elektrische Versorgungsnetz und das konkrete Nutzerverhalten gelegt werden. In der letzten Phase vom Jahr 2018 bis Ende 2020

¹⁶ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2012), S. 48.

¹⁷ Vgl. Proff (2015), S. 565.

sollte ein beginnender Massenmarkt mit tragfähigen, nachhaltigen Geschäftsmodellen entstehen.¹⁸

Mit Ende des Jahres 2018 wurde die Arbeit der NPE eingestellt und in die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) integriert.¹⁹ Im Gegensatz zum Ansatz der NPE, der vorwiegend auf F&E, technologischen und wissenschaftlichen Aspekten ausgerichtet war, ist der Fokus der NPM ein ganzheitlicher. So werden vor allem wirtschaftliche und gesellschaftliche Themen fokussiert.²⁰ Die NPM ist in sechs Arbeitsgruppen mit verschiedenen Schwerpunkten und einem übergeordneten Lenkungskreis organisiert. Die Abbildung 2-3 zeigt die Organisationsstruktur der NPM.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Ladeinfrastrukturplanung für EVs unter Beachtung der Restriktionen des elektrischen Versorgungsnetzes. Diese Thematik ist der Arbeit der Arbeitsgruppe 5 (AG 5) zuzuordnen. Nachfolgend wird die AG 5 charakterisiert, um die vorliegende Arbeit in ihrer Aktualität zu begründen. Die fünf anderen AGs der NPM werden in dieser Arbeit nicht beleuchtet, da zwar dem Gesamtkonstrukt Mobilität bzw. Elektromobilität dienen, jedoch keine tiefergehenden Verbindungen zu der vorliegenden Arbeit aufweisen.

Die AG 5 "Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Systemkopplung" fokussiert ihre Arbeit darauf, wie die Infrastruktur für alternative Antriebe ausgestaltet und ausgebaut sein muss, um die klimapolitischen Ziele des Jahres 2030 zu erreichen. Ziel ist es, einen Maßnahmenkatalog zu erarbeiten, der den konkreten Handlungsbedarf u.a. im Bereich der Ladeinfrastruktur und ihrer Integration in die Energienetze aufzeigt. Dazu sind seit Gründung der NPM bereits sieben Berichte der AG 5 erschienen, die den Handlungsbedarf aufzeigen. In ihrem Bericht vom Juli 2020 weist die AG 5 explizit darauf hin, dass der Ladeinfrastrukturaufbau und -betrieb unter Wettbewerbsbedingungen erfolgen soll. Es sollen also mehrere konkurrierende Wettbewerber Ladeinfrastrukturen betreiben und um die Kunden, bzw. Fahrer mit ihren EVs konkurrieren. Weiterhin ist auch ein intensiver Austausch zwischen Ladeinfrastrukturbetreibern und Energieversorgungsunternehmen erwünscht und gefordert, um die Energienetze im Hinblick auf die neu auftretenden Lasten auszubauen und zu optimieren.

¹⁸ Vgl. Die Bundesregierung (2009), S. 45.

¹⁹ Vgl. NPM (2019), S. 14.

²⁰ Vgl. NPM (2019), S. 14.

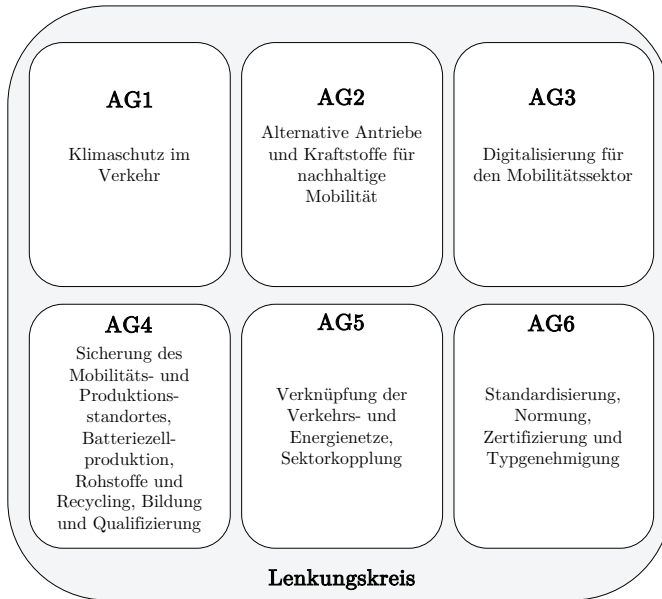


Abbildung 2-3: Organisationsstruktur der NPM

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an NPM (2019)²¹

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur zentraler Bestandteil für den Erfolg der Elektromobilität ist.²² Allerdings geht aus den bisherigen Ergebnissen der NPE und NPM hervor, dass insbesondere die fehlende flächendeckende öffentliche Ladeinfrastruktur als Hemmnis und Akzeptanzproblem für die Entwicklung der Elektromobilität anzusehen ist.²³ Auch die stark ansteigenden Zulassungszahlen von EVs im Jahr 2020 erhöhen den Druck, den Ladeinfrastrukturausbau zu beschleunigen.

2.3 Restriktionen der Ladeinfrastrukturplanung für Elektrofahrzeuge

2.3.1 Ökonomische Anforderungen und Rahmenbedingungen

Die ökonomischen Rahmenbedingungen der Elektromobilität lassen sich in eine Makro- und eine Mikroebene unterteilen. Auf der Makroebene liegt der Betrachtungs-

²¹ Vgl. NPM (2019), S. 32.

²² Vgl. NPM (2020) S. 2.

²³ Vgl. NPM (2018), S. 24.

schwerpunkt auf der globalen bzw. gesamtwirtschaftlichen Sicht. Wohingegen der Fokus der Mikroebene auf den Unternehmen der Automobil- und Zuliefererbranche sowie den Betreibern der Ladeinfrastrukturen liegt.

Auf der Makroebene wird die globale Erderwärmung als logische Folge des bisherigen Ausstoßes an Treibhausgasen und CO₂-Emissionen betrachtet und nach Lösungen des Problems gesucht. Die Kosten dieses Klimawandels, vornehmlich in Folge von zukünftigen Naturkatastrophen, werden von Experten mit einem globalen Wohlstandverlust von bis zu 20 % des Pro-Kopf-Einkommens beziffert.²⁴ Eine weitere ökonomische Konsequenz ist, dass die fossilen Energieträger sich zunehmend verknappen.²⁵ Beobachtbar ist das vor allem durch die steigenden Treibstoffpreise. So stieg der Benzinpreis in den Jahren 2000 bis 2020 um mehr als 35 % an.²⁶ Die Internationale Energieagentur erwartet eine nochmalige Steigerung der Preise von ca. 20 - 30 % bis zum Jahr 2035.²⁷ Zu bedenken ist auch, dass der größte Konsument von Erdöl, mit einem Anteil von über 50 % der globalen Nachfrage, der weltweite Verkehrssektor ist. Der Straßenverkehr war im Jahr 2019 für insgesamt 30 % der Nachfrage verantwortlich.²⁸ Auf der Mikroebene werden die ökonomischen Rahmenbedingungen zum einen durch die regulatorischen Anforderungen zur Senkung der CO₂-Emissionen bestimmt. Zum anderen zwingt das wachsende Umweltbewusstsein in der Bevölkerung die Automobilindustrie, nachhaltige und innovative Mobilitätskonzepte zu liefern.²⁹ Um im post-fossilen Zeitalter weiterhin steigende Absatzzahlen zu generieren, muss daher insbesondere die Elektromobilität erfolgreich am Markt etabliert werden.³⁰ Unter allen Alternativen wird dabei der Elektrifizierung des Antriebsstranges am ehesten zugetraut, eine ökonomisch umsetzbare Alternative im Vergleich zu den Verbrennungsmotoren zu bieten.³¹

Ein weiterer entscheidender Faktor der ökonomischen Rahmenbedingungen auf der Mikroebene ist die Infrastrukturabhängigkeit der Kraftfahrzeuge. Dies trifft vor allem auf innovative Fahrzeugkonzepte wie die der Elektromobilität zu. Derzeit ist die Infrastruktur für PKW mit Verbrennungsmotor barrierefrei zugänglich und in einem dichten

²⁴ Vgl. Stern (2007), S. 144.

²⁵ Vgl. Akkad (2015), S. 1.

²⁶ Vgl. Statista (2020).

²⁷ Vgl. International Energy Agency (2011), S. 61-62.

²⁸ Vgl. Deutscher Bundestag (2019), S. 7.

²⁹ Vgl. Baum und Delfmann (2010), S. 12.

³⁰ Vgl. Rennhak (2009), S. 3 sowie NPM (2019), S. 9-10.

³¹ Vgl. Fazel (2014), S. 10 sowie Canzler und Knie (2009), S. 7.