



Technische Universität München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)

Elektromobilität als Baustein der Energiewende – Chancen und Potentiale der zukünftigen Individu- almobilität in ausgesuchten Raum- und Sied- lungsstrukturen

Markus Wagner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher
2. Prof. Dr. Gerd Peyke

Die Dissertation wurde am 12.04.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 21.11.2016 angenommen.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, wie weit sich unterschiedliche Raum- und Siedlungsstrukturen für die Integration von Elektrofahrzeugen als Baustein der Energiewende eignen und welche grundlegenden Aspekte dabei für den Aufbau der notwendigen Ladeinfrastruktur zu beachten sind. Die Analyse wird anhand der vier Fallbeispiele Singapur, Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach als Vertreter unterschiedlicher Strukturen von Megastädte bis zum ländlichen Raum durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf den Kriterien Verkehrs- und Parkraumstruktur, Energieinfrastruktur und Ladestrombereitstellung sowie auf einer ersten Abschätzung der Kosten für sinnvolle Ladeinfrastruktursysteme. Zur Beantwortung der Frage kommen neben empirischen Methoden Raum- und Energiemodelle zum Einsatz, deren Vergleich untereinander die Beurteilung der Eignung verschiedener Räume für die Integration von Elektrofahrzeugen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen zulässt.

Abstract

Within the scope of this thesis, the question is considered to what extent different spatial and settlement structures are qualified for the integration of electric vehicles as an element of the “Energiewende” and which fundamental aspects for the development of the required charging infrastructure have to be taken into account. The analysis is carried out by means of the four example cases Singapore, Frankfurt am Main, Ingolstadt and Schöllnach as typical representatives of different structures scaling from megacities to rural areas. Thereby, the focus will be on the criteria transport and parking space structure, energy infrastructure and generation of charging energy as well as first cost evaluations of reasonable charging infrastructures. In order to answer this question, empirical methods as well as various spatial and energy models are employed. A concluding comparison assesses the suitability of the determined structures for the integration of electric vehicles and permits the development of recommendations for action.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München sowie während meines Aufenthaltes bei TUM CREATE in Singapur.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher, der meine Arbeit zunächst als kommissarischer Leiter des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik und später als Ordinarius des Lehrstuhls für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme hervorragend und persönlich engagiert betreut hat. Herrn Prof. Dr. Gerd Peyke von der Universität Augsburg danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen an der Technischen Universität München und in Singapur für die Unterstützung, den fachlichen Austausch und die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Studierenden für ihr Interesse und ihre Beiträge zu meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich in jeder Hinsicht unterstützt.

München, Dezember 2016

Markus Wagner

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Einordnung der Thematik	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	4
1.3	Struktur der Arbeit	5
2	Elektromobilität: Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1	Antriebskonzepte und -technologien	9
2.1.1	Hybridfahrzeuge	9
2.1.1.1	Micro-Hybrid	10
2.1.1.2	Mild-Hybrid.....	11
2.1.1.3	Voll-Hybrid.....	11
2.1.1.4	Plug-In-Hybrid	14
2.1.2	Batterieelektrische Fahrzeuge	15
2.1.3	Brennstoffzellenfahrzeuge	17
2.2	Energiespeicherung.....	18
2.2.1	Batterietechnologien	18
2.2.1.1	Lithium-Ionen-Batterien.....	20
2.2.1.2	Weitere und neuartige Batteriekonzepte	22
2.2.2	Brennstoffzelle.....	24
2.3	Versorgungsinfrastrukturen für Fahrzeuge	27
2.3.1	Herkömmliche Konzepte	28
2.3.2	Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge.....	32
2.3.2.1	Konduktive Ladetechnologien	34
2.3.2.2	Induktive Ladetechnologien	35
2.3.2.3	Batteriewechsel.....	36
2.3.3	Ladestandorte für Elektrofahrzeuge	37
2.3.3.1	Privater Raum.....	38
2.3.3.2	Halböffentlicher Raum.....	39
2.3.3.3	Öffentlicher Raum	40
2.3.4	Ausbauzustand der Ladeinfrastruktur in Deutschland und der Welt	40
2.4	Energiebereitstellung für Elektrofahrzeuge.....	43

2.5	Elektromobilitätsmarkt	46
2.5.1	Fahrzeugmarkt in Deutschland	46
2.5.2	Fahrzeugmarkt international	48
3	Räume im nationalen und internationalen Kontext.....	51
3.1	Grundbegriffe und Definitionen.....	51
3.1.1	Stadt / Städtischer Raum	51
3.1.2	Land / Ländlicher Raum.....	53
3.1.3	Konzept der Stadtregion.....	55
3.2	Klassifizierungen von Raum- und Siedlungsstrukturen	56
3.2.1	Klassifizierung für OECD-Länder	56
3.2.2	Europäische regionalstatistische Gliederung	62
3.2.3	Klassifizierung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung	64
3.3	Allgemeines Verkehrs- und Mobilitätsverhalten.....	66
3.3.1	Mobilitätsverhalten in städtischen Siedlungsstrukturen	67
3.3.2	Mobilitätsverhalten in ländlichen Siedlungsstrukturen.....	68
3.4	Kurzcharakterisierung der Untersuchungsgebiete.....	74
3.4.1	Stadtstaat Singapur	75
3.4.2	Stadt Frankfurt am Main	79
3.4.3	Stadt Ingolstadt	81
3.4.4	Marktgemeinde Schöllnach	84
4	Methoden und Vorgehensweise	89
4.1	Räumliche Modellierung	89
4.1.1	Mobilität	90
4.1.2	Energie.....	94
4.2	Energetische Modellierung	96
4.2.1	TIMES: Allgemeine Modellstruktur.....	96
4.2.2	Modell „TIMES Singapur“	99
4.2.3	Modell „TIMES Ingolstadt“.....	101
4.3	Mobilitätsbefragung	101
4.3.1	Grundgesamtheit und Stichprobe.....	102
4.3.2	Auswahlverfahren und Repräsentativität	104

4.3.3	Fragebogenstruktur	105
5	Fallbeispiele: Ergebnisdarstellung	109
5.1	Megastadt Singapur	109
5.1.1	Verkehrs- und Parkraumstruktur	109
5.1.2	Energieinfrastruktur und Strombereitstellung	117
5.2	Städtische Strukturen.....	134
5.2.1	Frankfurt am Main	135
5.2.1.1	Verkehrs- und Parkraumstruktur	135
5.2.1.2	Energieinfrastruktur und Strombereitstellung	144
5.2.2	Ingolstadt	151
5.2.2.1	Verkehrs- und Parkraumstruktur	151
5.2.2.2	Energieinfrastruktur und Strombereitstellung	158
5.3	Ländliche Gemeinde Schöllnach.....	167
5.3.1	Ergebnisse der empirischen Analysen	167
5.3.1.1	Mobilitätsverhalten und Kenngrößen.....	167
5.3.1.2	Verkehrs- und Parkraumstruktur	176
5.3.2	Energieinfrastruktur und Strombereitstellung	186
5.4	Kostenabschätzung von Ladeinfrastruktursystemen	189
5.5	Ergebniszusammenfassung	197
6	Vergleichende Analyse der Fallbeispiele und Fazit	199
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	205
	Anhang: Fragebogen zum Mobilitätsverhalten in Schöllnach	209
	Abbildungsverzeichnis.....	213
	Tabellenverzeichnis	219
	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	221

1 Einleitung

1.1 Motivation und Einordnung der Thematik

Die Elektromobilität bewegte bereits vor mehr als 100 Jahren die Gesellschaft. Schon im Jahre 1834 entwickelte Thomas Davenport in den USA ein mit Primärbatterien betriebenes Fahrzeug. In Berlin nahmen in den 1880er Jahren die ersten elektrischen Straßenbahnen ihren Betrieb auf. Erst 1886 hingegen wurde das weltweit erste Fahrzeug mit Verbrennungsmotor von Benz und Daimler in Zusammenarbeit entwickelt und vorgestellt. [1, 2]

Am Ende des 19. Jahrhunderts und zu Beginn des 20. Jahrhunderts dominierten elektrisch betriebene Automobile das Straßenbild in Europa und Amerika. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren traten gegenüber den leisen und lokal emissionsfreien Konkurrenten in den Hintergrund. Allein in New York verfügten damals über 90 % aller Taxis über einen Elektroantrieb. Erst mit der Einführung des in Fließbandarbeit gefertigten Model T von Henry Ford im Jahre 1914 erlangten die verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge langsam die Oberhand. Die Fahrzeugkosten konnten somit durch Massenproduktion deutlich gesenkt werden. Nicht zuletzt trug auch der elektrische Anlasser zur Popularität von Verbrennerfahrzeugen bei. [1, 2]

Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurde ausschließlich auf den Verbrennungsmotor gesetzt. Immer wieder wurden jedoch in den USA, Japan und Europa vereinzelt Versuche unternommen, die Thematik der Elektrofahrzeuge neu zu entfachen. Aber auch Ölkrisen, wie sie beispielsweise Anfang der 1970er Jahre auftraten, trugen nicht zum durchschlagenden Erfolg elektromobiler Antriebsformen bei. Der elektrifizierte Antriebsstrang wurde nur am Rande behandelt. [1, 2]

In den vergangenen 20 Jahren jedoch nahmen die Diskussionen um die Ressourcenknappheit, den steigenden CO₂-Ausstoß im Verkehrssektor sowie den globalen Klimawandel weltweit sowohl in gesellschaftlicher als auch in politischer Dimension stark zu. Der Begriff der Elektromobilität war erneut im Fokus und erfuhr eine Art Renaissance. Die Politik in Deutschland reagierte schließlich in jüngster Zeit mit der Vorlage des Nationalen Entwicklungsplanes Elektromobilität, gefolgt von der Gründung der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Zudem werden verstärkt in Schaufenstern Aktivitäten im Bereich der Elektromobilität gefördert. [2] Vergleichbare Entwicklungen sind weltweit zu beobachten.

Welche Position dem Verkehrssektor im Zuge der Diskussion um die Erreichung von Klima- und Energiezielen zukommt, wird durch Betrachtung von **Abbildung 1.1** deutlich.

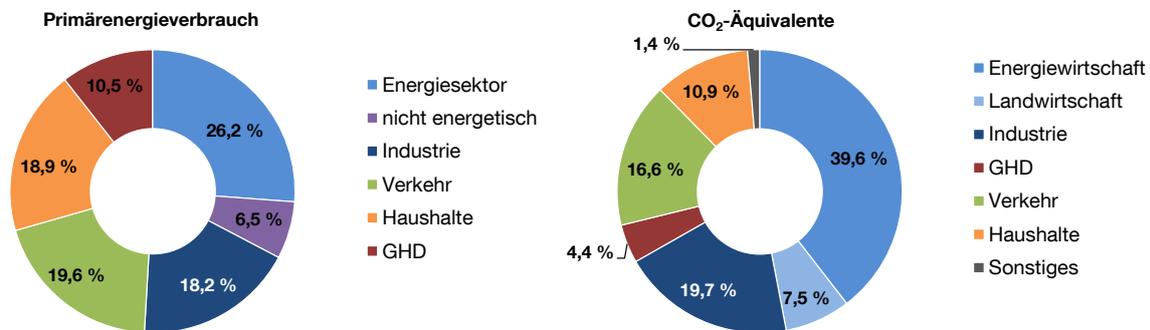


Abbildung 1.1: Primärenergieverbrauch (links) und Treibhausgasemissionen in Deutschland (rechts) nach Sektoren (Daten: [3, 4])

Der Verkehrssektor zeichnet in Deutschland für ca. 20 % des Primärenergieverbrauchs und etwa 17 % der gesamten Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) verantwortlich. Innerhalb des Verkehrssektors werden die Emissionen vorwiegend durch diesel- und benzinbetriebene Pkw und Nutzfahrzeuge verursacht. Eine verstärkte Nutzung alternativer Antriebskonzepte in der Zukunft kann einen wesentlichen Beitrag zu einer deutlichen Erhöhung der Energieeffizienz innerhalb des Sektors sowie zur Erreichung gesteckter Energie- und Emissionsziele liefern.

Doch Elektromobilität im Individualverkehr ist nach wie vor ein kontrovers diskutiertes Thema. Um die Mobilität und den Verkehr zukünftig nachhaltiger zu gestalten, sind die Erschließung neuer Möglichkeiten innerhalb des Individualverkehrs und deren energetische und wirtschaftliche Untersuchung essentiell. Gerade in Zeiten des immer stärker zunehmenden Verkehrs – auch bedingt durch die Nutzung von Größenvorteilen sowohl in der Industrie und des Bildungsbereichs als auch vor allem im privaten Bereich – ist es notwendig, den Herausforderungen der Mobilität zu begegnen.

In der vergangenen Zeit lag der Untersuchungsschwerpunkt in Studien und Initiativen, die sich die Integration von Elektrofahrzeugen zum Thema nehmen, in der Hauptsache auf Städten und Agglomerationsräumen. So hat beispielsweise BMW seine Elektrofahrzeuge als Megacity Vehicle (MCV) für den Einsatz in Städten entwickelt und konzipiert [5]. Auch im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der Nanyang Technological University (NTU) in Singapur und der TU München im Forschungsprojekt „TUM CREATE“ wird untersucht, wie ein Elektrofahrzeug für tropi-

sche Megastädte entwickelt und sinnvoll eingesetzt werden kann und welche Einflüsse eine Integration auf die Megastadt zur Folge haben könnte [6]. In Deutschland wird der Einsatz elektromobiler Konzepte für Städte z. B. im öffentlichen Verkehr oder die Erprobung von urbanen Ladeinfrastruktursystemen in den vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (früher: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)) geförderten Modellregionen Elektromobilität untersucht [7]. Gewiss erscheint in städtischen Strukturen eine Nutzung elektromobiler Antriebstechnologien im Individualverkehr vorteilhaft, auch vor dem Hintergrund der zunehmenden Urbanisierung. Zum einen herrschen in Städten im Allgemeinen geringe Durchschnittsgeschwindigkeiten und geringe Tagesfahrleistungen, zum anderen ist der Wunsch nach einer Reduzierung von Smog, lokalen Treibhausgas- und Lärmemissionen gegeben. Aufgrund steigender Bevölkerungszahlen in Städten und Ballungsräumen wird der Verkehr jedoch zukünftig gerade in verdichteten Räumen weiter stark zunehmen. Der Individualverkehr und damit die potentielle Nutzung von Elektrofahrzeugen dürften in diesen Regionen somit an ihre Grenzen stoßen und hinter die effiziente Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs zurücktreten.

Im ländlichen Raum hingegen könnte der Einsatz der Elektromobilität im Individualverkehr in der Zukunft aufgrund der zentralen Stellung des Pkw eine wesentliche Rolle spielen. Zukunftsweisende Projekte sind diesbezüglich bereits gestartet worden. Im Schaufenster „Bayern-Sachsen Elektromobilität verbindet“ werden ca. 40 Projekte an den Schnittstellen Elektrofahrzeug, Energiesystem und Verkehrskonzepte definiert und durchgeführt. Ein inhaltlicher Schwerpunkt basiert dabei auf der ländlichen Mobilität und der Überwindung größerer Entfernungen und anspruchsvoller Topografien mittels Elektrofahrzeugen sowie der Analyse und Bewertung des Nutzerverhaltens im ländlichen Raum [8]. Erkenntnisse und Erfahrungen dazu konnten auch schon in den Projekten „eE-Tour Allgäu“ oder „E-Wald“, dessen Untersuchungsregion sich auf den Bayerischen Wald erstreckt, gewonnen werden. Dass die Integration von Elektrofahrzeugen in ländlichen und geografisch anspruchsvollen Regionen sinnvoll und möglich ist, soll in diesen Projekten gezeigt und nachgewiesen werden [8, 9]. Eine gezielte Förderung der ländlichen Räume hinsichtlich der Nutzung alternativer Antriebssysteme ist neben der Berücksichtigung von Städten auch Bestandteil der Modellregionen Elektromobilität [7]. Die Modellkommune für Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen hat sich zum Ziel gesetzt, die Elektromobilität im touristischen und ländlichen Raum verstärkt ganzheitlich zu untersuchen, indem der Fokus auf eine intelligente Ladeinfrastruktur und ein intelligentes Stromnetz gelegt sowie die Intermodalität z. B. durch Carsharing-Angebote an Bahnhöfen

gestärkt wird [10]. Eine verstärkte Einbindung des ländlichen Raumes in die Diskussion um die Integration alternativer Antriebstechnologien geschieht beispielsweise auch durch die Landesinitiative Elektromobilität der Landesregierung in Baden-Württemberg. Diese Einbindung soll mithilfe von 20 Modellprojekten realisiert werden, wobei unter anderem auch Pendlerströme und die Nutzung von Elektrofahrzeugen in der Region eine Rolle spielen könnten [11]. Grundsätzlich führt eine geringe Arbeitsplatzdichte auf dem Land zu immer mehr Vollzeitpendlern, die außerhalb des Stadtzentrums wohnen und somit als mögliche Nutzer von Elektrofahrzeugen in Frage kommen. Zudem verfügt in ländlich geprägten Gegenden ein Großteil der Bevölkerung über einen Pkw-Stellplatz, der hinsichtlich des initialen Aufbaus einer Ladeinfrastruktur Vorteile bieten kann. Damit sind nicht nur die Faktoren der Reichweite und der Emissionen von Interesse, sondern auch neue Entwicklungen im Bereich der Ladeinfrastruktur.

Elektromobilität ist ohne Frage ein wichtiger Baustein der Energiewende und ein wesentlicher Schlüssel zum Aufbau einer umweltgerechten Mobilität. In Kombination mit erneuerbaren Energien ist es möglich, einen Strukturwandel im energieintensiven Sektor des Verkehrs zu erreichen. Abhängig von Stadt- und Siedlungstypen ergeben sich vielerlei Herausforderungen, denen es sich zu stellen gilt.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Perspektiven der Integration von Elektrofahrzeugen in unterschiedliche Raum- und Siedlungsstrukturen zu untersuchen und zu bewerten und der Frage nach der Eignung von Räumen für die Elektromobilität nachzugehen.

Der Einsatz elektromobiler Antriebskonzepte wird dafür in verschiedenen Untersuchungsregionen in Singapur und Deutschland (Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach) miteinander verglichen. Obwohl die Stadt Singapur als einzige nicht-deutsche Untersuchungsregion eine Sonderstellung einnimmt, weist sie dennoch als Vergleichsregion (mit deutlichen Merkmalen einer Megastadt) mit verschiedenen Räumen in Deutschland eine sehr gute Eignung auf und erweitert die Untersuchungsregionen um die Struktur Megastadt. Die Fragestellung zielt zudem auf die potentielle Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und deren Besonderheiten in unterschiedlichen Siedlungsstrukturen ab. Dabei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Kriterien Verkehrs- und Parkraumstruktur, Energieinfrastruktur und Ladestrombereitstellung sowie auf der ersten Abschätzung von Kosten für sinnvolle Ladeinfrastruktursysteme.

Zur Beantwortung der Frage kommen neben empirischen Methoden unterschiedliche Raum- und Energiemodelle zum Einsatz. Um der Vielschichtigkeit der Thematik bezüglich der Betrachtung unterschiedlicher Dimensionen (Parkraum, Energiebereitstellung, Kosten usw.) und der Verwendung z. T. heterogener Daten Rechnung zu tragen, wurde ein vergleichender Ansatz von unterschiedlichen, auf die Untersuchungsgebiete angepassten, Modellen gewählt. Es erfolgt eine Beleuchtung der Kriterien aus verschiedenen Blickwinkeln und Perspektiven.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungsregionen untereinander lässt schließlich die Beurteilung einer grundsätzlichen Eignung verschiedener Raum- und Siedlungsstrukturen für die Integration von Elektrofahrzeugen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für den Aufbau einer sinnvollen Ladeinfrastruktur zu. Die Untersuchungen des ländlichen Raumes im Hinblick auf Mobilität und Energie sowie der Wechselwirkungen zwischen den Räumen sollen gegenüber den in Kapitel 1.1 aufgeführten Studien und Initiativen zusätzlich mögliche Entwicklungszusammenhänge identifizieren.

1.3 Struktur der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Technik der Elektromobilität beschrieben. Neben der Darstellung relevanter Antriebskonzepte und der Einschätzung der aktuellen Situation in den für die Elektromobilität wesentlichen Technologiebereichen (Energiespeicherung, Ladeinfrastruktur und Energiebereitstellung), wird auf die aktuelle Marktsituation in Deutschland und der Welt eingegangen. Nach der Einführung von Grundbegriffen und der Klassifizierung von Raum- und Siedlungsstrukturen präzisiert Kapitel 3 zudem die Besonderheiten des Mobilitätsverhaltens im städtischen und ländlichen Raum und führt eine Kurzbeschreibung der Untersuchungsgebiete durch. Anschließend erfolgt in Kapitel 4 die Darlegung der Datengrundlagen sowie der methodischen Vorgehensweise. Die grundlegenden Modelle und Verfahren zur späteren Gewinnung und Ableitung von Ergebnissen werden erläutert.

Kapitel 5 geht auf die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse in den Fallbeispielen bzw. Untersuchungsregionen Singapur, Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach ein. Der Fokus liegt dabei auf der Verkehrs- und Parkraumstruktur, der Energieinfrastruktur und Strombereitstellung sowie auf potentiellen Kosten für den Ladeinfrastrukturaufbau. Zusätzlich erfolgt in Kapitel 6 eine vergleichende Analyse der unterschiedlichen Regionen, woraus wesentliche Aussagen zur Nutzung von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Strukturen und zum Aufbau einer entsprechen-

den Ladeinfrastruktur erarbeitet werden. Abschließend fasst Kapitel 7 die wesentlichen Kernaussagen der Arbeit ausblickend zusammen.

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit bauen auf Vorarbeiten auf und wurden bereits in mehreren Veröffentlichungen publiziert. So sind einige Ausführungen in Kapitel 3 teilweise veröffentlicht in:

- Wagner, M.; Hamacher, T.: Electromobility – Future Transport Solution for Suburban and Rural Areas?. Vorgestellt auf EVTeC and APE Japan 2014. Yokohama 2014.

Teile der in Kapitel 4 beschriebenen Methodik zur Ermittlung von Potentialen der erneuerbaren Energien sind enthalten in:

- Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Eder, T.: Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt. Endbericht. München und Ingolstadt 2014.

Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die Untersuchungsregionen in Kapitel 5 enthalten Bestandteile, die teilweise publiziert sind in:

- Wagner, M.; Hamacher, T.: The possible role of PV in the Singaporean power system. Vorgestellt auf PV Asia Pacific Conference 2011. Singapur 2011.
- Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Hamacher, T.: Impacts of Photovoltaics and Electromobility on the Singaporean Energy Sector. In: Energy Procedia 25 (2012), S. 126–134.
- Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Eder, T.: Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt. Endbericht. München und Ingolstadt 2014.
- Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Hamacher, T.: Model-based Analysis of Singapore's Energy System. In: Dincer, I.; Midilli, A.; Kucuk, H. (Hrsg.): Progress in Sustainable Energy Technologies Vol 1. Generating Renewable Energy. Cham 2014.

Folgende aufgeführte Artikel wurden im Rahmen der Erarbeitung dieser Studie parallel veröffentlicht, sind jedoch nicht Hauptbestandteil dieser Arbeit. An einigen wenigen Stellen sind Verweise auf diese Publikationen angegeben. Sie bieten weiterführende Informationen:

- Wagner, M.; Gohla-Neudecker, B.; Wagner, U.: Energetische Quantifizierung des Heizenergiebedarfs einer Elektrofahrzeugflotte. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61 (2011) 8, S. 38–41.

-
- Reuter, B.; Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Gleyzes, D.; Massier, T.; Hamacher, T.; Lienkamp, M.: Life cycle greenhouse gas analysis for automotive applications – A case study for taxis in Singapore. In: International Journal of Smart Grid and Clean Energy 3 (2014) 2, S. 127–134.
 - Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Dierkes, S.; Münch, K.; Hans, M.; Fiedeldey, M.; Hamacher, T.; Moser, A.: Veränderte Anforderungen an städtische Energieinfrastrukturen durch die Energiewende am Beispiel Frankfurt am Main. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64 (2014) 10, S. 75-78.
 - Münch, K.; Dierkes, S.; Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Neubauer, F.; Bader, A.; Hans, M.: Spartenübergreifende Ermittlung langfristiger kostenoptimaler Zielnetzstrukturen (Strom, Gas und Fernwärme) im Stadtgebiet Frankfurt am Main. In: Moser, A. (Hrsg.): Jahresbericht 2014. Aachener Beiträge zur Energieversorgung. Aachen 2014.

2 Elektromobilität: Grundlagen und Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen sowie der Stand der Technik auf dem Gebiet der Elektromobilität erarbeitet und zusammengefasst. Zunächst werden dabei die wesentlichen Antriebskonzepte kurz dargestellt und kommentiert. Es folgen Erläuterungen zur Energiespeicherung in Fahrzeugen, zu Versorgungsinfrastrukturen für Fahrzeuge und zur Energieerzeugung und Energiebereitstellung. Abschließend folgt eine Markteinschätzung der Elektromobilität in Deutschland und der Welt.

2.1 Antriebskonzepte und -technologien

Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte können grundsätzlich nach mehreren Arten unterschieden werden. Alternative Antriebskonzepte gliedern sich in Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle – HEV), reine batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV). Folgende Ausführungen beschreiben diese Konzepte im Detail.

2.1.1 Hybridfahrzeuge

Allen Hybridfahrzeugen gemein ist das Vorhandensein eines herkömmlichen Verbrennungsmotors sowie eines Elektromotors als Energiewandler samt jeweiligem Energiespeichersystem (z. B. Tank oder Batterie) in ihrem Antriebsstrang. Sie nehmen somit eine Position als Brückentechnologie zwischen verbrennungsmotorischem und vollständig elektrischem Fahren ein. In ihren unterschiedlichen Hybridisierungsgraden des Micro-, Mild- und Voll-Hybrids sind derartige Konzepte nicht auf infrastrukturelle Lösungen hinsichtlich des Ladens der Fahrzeugbatterie angewiesen. Eine Aufladung der Fahrzeugbatterie über das Stromnetz ist bei diesen Technologien mit Ausnahme des Plug-In-Hybrids (Plug-In Hybrid Electric Vehicle – PHEV) nicht bestimmend. Voll-Hybridfahrzeuge können zusätzlich nach ihrer Systemstruktur eingeteilt werden (serieller, paralleler und leistungsverzweigter Hybridantrieb).

In **Abbildung 2.1** ist eine Übersicht der Hybridklassen nach ihrer elektrischen Leistung gegeben.

Die Klassifizierung nach Micro-, Mild-, Voll- und Plug-In-Hybrid basiert im Wesentlichen auf dem Grad der Elektrifizierung und dem Vorhandensein elektrischer Komponenten im Fahrzeug. Ausschlaggebend ist zum einen die Leistung des Elektromotors und sind zum anderen die elektrisch durchführbaren Nebenfunktionen, die vom Micro-Konzept zum Plug-In-Konzept stetig zunehmen.

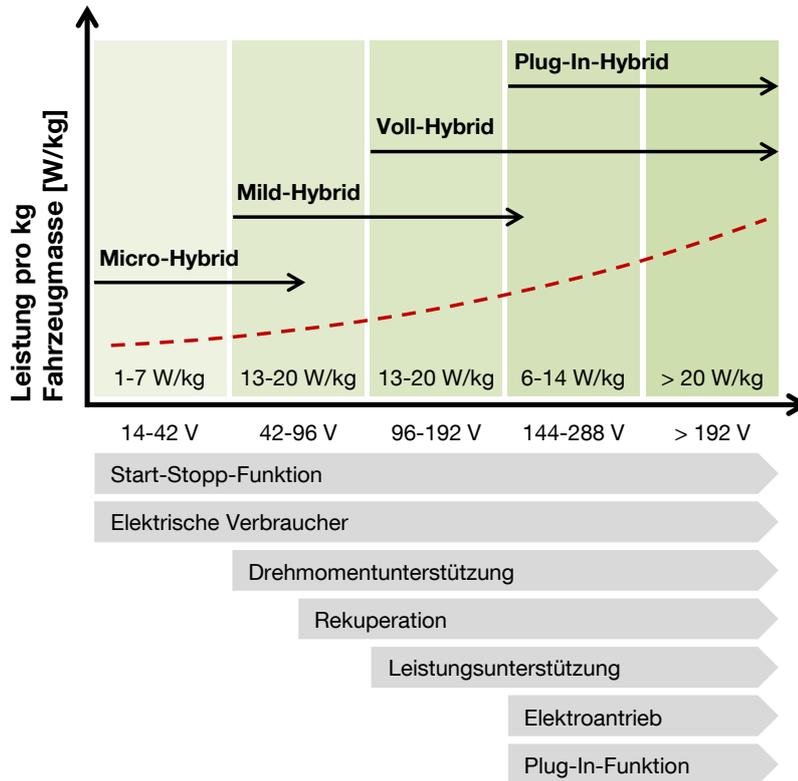


Abbildung 2.1: Hybridklassen nach elektrischer Leistung, eigene Darstellung nach [1, 12]

2.1.1.1 Micro-Hybrid

Konventionelle Verbrennerfahrzeuge lassen sich durch einfache Modifikationen als Micro-Hybrid-Fahrzeuge nutzen. Prinzipiell erfolgt dabei nur eine Substitution des konventionellen Anlassers und der Lichtmaschine durch einen sogenannten Starter-Generator. Die Leistung der elektrischen Maschine liegt gewöhnlich unter 5 kW, das Bordsystem wird weiterhin bei 12 V betrieben. [12]

Micro-Hybrid-Fahrzeuge zeichnen sich durch die Nutzung einer Start-Stopp-Automatik aus. Bei Stillstand des Fahrzeuges erfolgt eine Abschaltung des Verbrennungsmotors, der beim anschließenden Anfahren automatisch wieder gestartet wird. Aufgrund häufig auftretender Startvorgänge des Motors verfügt die Starterbatterie deshalb über eine geringfügig erhöhte Kapazität. [12] Die Funktion der Start-Stopp-Automatik ermöglicht über eine rudimentär gehaltene Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation), die Starterbatterie des Fahrzeuges zu laden.

Der verbaute Elektromotor ist jedoch nicht für die alleinige Traktion des Fahrzeuges nutzbar. Vielmehr ermöglicht das Start-Stopp-System ein Abschalten des Motors im Stillstand des Fahrzeuges und trägt somit zur Einsparung von Kraftstoff und CO₂-

Emissionen bei. Verglichen mit dem konventionellen Fahrbetrieb lassen sich bei der Nutzung von Micro-Hybrid-Fahrzeugen Kraftstoffeinsparungen von 5 bis 10 % realisieren. [12–14]

Nachteilig dürfte sich bei Micro-Hybrid-Fahrzeugen aufgrund häufigerer Startvorgänge sicherlich der höhere Verschleiß von Anlasser, Batterie und Motor auswirken.

2.1.1.2 Mild-Hybrid

In der zweiten, fortgeschrittenen Hybridisierungsstufe des Mild-Hybrids kann im Gegensatz zum Micro-Hybrid der Elektromotor zum Verbrennungsmotor unterstützend eingesetzt werden und somit die Systemleistung des Fahrzeuges erhöhen (Boost-Funktion als Anfahr- oder Beschleunigungsunterstützung). Die elektrische Maschine weist bei diesem Konzept bereits Leistungen von 5 bis 15 kW auf (bei 42-150 V). Aber auch dieses Antriebskonzept macht ein rein elektrisches Fahren nicht möglich, da der Elektromotor fest mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Die beim Bremsen entstehende Energie kann auch beim Mild-Hybrid teilweise zurückgewonnen und in der Batterie gespeichert werden. Dazu wird die elektrische Maschine als Rekuperator verwendet. Zudem erlaubt dieses Antriebskonzept das sogenannte Segeln, bei dem das Fahrzeug hauptsächlich vom verbauten Elektromotor angetrieben wird und der Verbrennungsmotor im Leerlauf verbleibt. Dies ist jedoch nur bis zu einer geringen Geschwindigkeit möglich (z. B. im Stadtverkehr). [12]

Im Vergleich zum Micro-Hybrid entstehen beim Mild-Hybrid deutlich komplexere Betriebszustände, was letztendlich zu mehr notwendigen Systemkomponenten im Fahrzeug führt. Diese umfassen eine größere elektrische Maschine, eine fortgeschrittene Batterietechnik, gegebenenfalls Kondensatoren zur Zwischenspeicherung der Energie und leistungsfähigere Steuergeräte für das Batteriemanagement. [12]

2.1.1.3 Voll-Hybrid

Rein elektrisches Fortbewegen ist erstmals in der Hybridisierungsstufe des Voll-Hybriden möglich. Die elektrische Maschine erreicht dabei Leistungswerte über 20 kW. Die Kopplung der elektrischen mit den verbrennungsmotorischen Komponenten kann bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen auf unterschiedliche Weise erfolgen. So wird grundsätzlich zwischen seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Formen, also nach der Systemstruktur des Fahrzeuges, unterschieden. Im Allgemeinen ergibt sich bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen eine erhöhte Bauteilkomplexität. Je nach Ausführungsform kommen daher mehrere elektrische Maschinen, bauraumoptimierte Getriebe und Batteriezellen zum Einsatz. [12]

Die grundsätzlich möglichen Ausführungsformen eines Voll-Hybriden sind in **Abbildung 2.2** schematisch dargestellt.

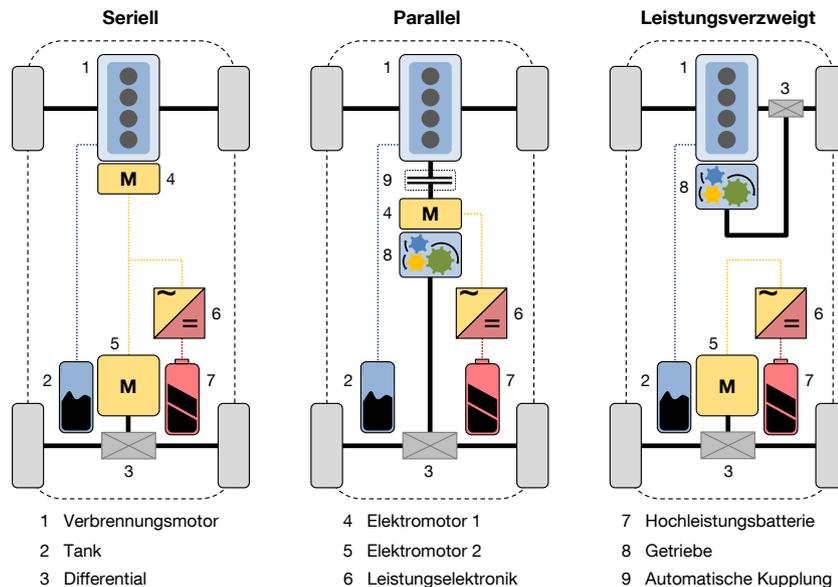


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung unterschiedlicher hybrider Antriebsstränge, eigene Darstellung nach [1, 15]

Ein serieller hybrider Antriebsstrang (linkes Schema) besitzt einen mit dem Verbrennungsmotor starr gekoppelten Elektromotor (Generator) und einen weiteren, der eine Anbindung an das Differential bzw. Getriebe herstellt (Fahrzeugantrieb). Eine Hochleistungsbatterie kann über die verbaute Leistungselektronik dem Antriebsmotor Energie zuführen. In dieser Ausführung ist der Verbrennungsmotor mechanisch nicht an die Antriebsräder angebunden, sondern treibt lediglich den gekoppelten Elektromotor als Generator an. Dies führt zur größtmöglichen Freiheit in Bezug auf die Betriebsweise des Verbrennungsmotors. [14]

Der Benzin- oder Dieselmotor kann als Reichweitenverlängerer (Range Extender) bezeichnet werden und arbeitet nur, wenn die Hochleistungsbatterie den Elektromotor nicht mehr ausreichend versorgen kann. Vorteilhaft erweist sich die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor in einem idealen Wirkungsgradbereich betreiben zu können (Lastspitzen werden über die Batterie gedeckt) sowie die Möglichkeit, das Fahrzeug bis zum Eingreifen des Verbrennungsmotors rein elektrisch anzutreiben. Hybridfahrzeuge mit serielltem Antriebsstrang erlauben neben konventionellem Fahren die Modi Elektrisches Fahren, Boosten (volle Leistung des Verbrennungsmotors und zusätzliche Nutzung der in der Batterie gespeicherten elektrischen Energie im elektrischen Antriebsmotor), Rekuperation und Lastpunktanhebung, bei dem sich der Verbrennungsmotor im günstigsten Verbrauchspunkt befindet und den Elektromotor als Ge-

nerator antreibt. Die Generatorleistung wird zum Teil zum Laden der Batterie genutzt. [12, 15, 16] Varianten mit Radnabenmotoren sind darüber hinaus ebenfalls möglich [14].

Die parallele Ausführungsform des Vollhybriden zeichnet sich durch eine erweiterte Funktionalität aus, indem neben den beiden Antriebsmotoren und Speichern zusätzliche Komponenten wie Getriebe und automatische Kupplungen in den Antriebsstrang Eingang finden (mittiges Schema in Abbildung 2.2). Der Verbrennungsmotor sowie der Elektromotor sind mechanisch mit den Antriebsrädern verbunden. Somit können beide Systeme unabhängig voneinander oder auch zusammen betrieben werden (gleichzeitige Leistungsverfügbarkeit beider Aggregate). Verglichen mit einem konventionellen Antrieb können aufgrund dieser aggregierten Leistungen bei gleichen Fahrleistungen die beiden Motoren kleiner dimensioniert werden. Folgende Betriebsmodi sind bei parallel ausgelegten Voll-Hybrid-Fahrzeugen möglich: Konventionelles Fahren, Elektrisches Fahren, Boosten, Rekuperation sowie Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors. Um beispielsweise in Städten einen emissionsfreien Fahrbetrieb gewährleisten zu können, kann der elektrische Antrieb genutzt werden. Für längere und leistungsintensivere Fahrten (Autobahn, Überland) ist schließlich der Verbrennungsmotor zu betreiben. [12, 14–16]

Das in Abbildung 2.2 rechterhand dargestellte Schema zeigt ein Beispiel eines leistungsverzweigt ausgeführten Voll-Hybriden, der als Mischhybrid Charakteristiken des seriellen und parallelen Hybrids vereint. Daneben existieren weitere Varianten und Konzepte der Leistungsverzweigung. Diese Formen zeichnen sich durch eine mechanische Kopplung sowohl der elektrischen Maschine als auch des Verbrennungsmotors mit dem Antriebsstrang aus. Grundsätzlich verfügen leistungsverzweigte Antriebe über ein Planetengetriebe, das es erlaubt, im Zusammenwirken aller gekoppelten Komponenten als stufenloses Getriebe zu fungieren. Ein Teil der Leistung des Verbrennungsmotors wird direkt an die Antriebsräder übermittelt, während der verbleibende Teil über das Planetengetriebe von den Elektromotoren zur Verfügung gestellt wird. Dies steigert den Fahrkomfort. Aufgrund der bereits erwähnten Leistungsaddition (Momentenaddition) beider Aggregate kann auch bei leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen eine kleinere Dimensionierung der Antriebe erreicht werden. [12, 14–16]

Eine weitere Mischform aus seriellem und parallelem Hybrid stellt der sogenannte kombinierte Hybrid dar.

Hinsichtlich der Realisierung von Voll-Hybriden stellt die Batterietechnik die größte Hürde dar. Im Vergleich zu Micro- und Mild-Hybriden, die kein rein elektrisches Fahren ermöglichen, sind bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen wesentlich höhere Batteriekapazitäten erforderlich [12]. Die möglichen elektrischen Reichweiten sind abhängig von der eingesetzten Batterietechnologie und können durch den Fortschritt in der Batterieforschung in Zukunft deutlich erhöht werden.

Parallele oder leistungsverzweigte Hybridstrukturen sind im Vergleich zur seriellen Struktur bei aktuellen Fahrzeugen weit verbreitet.

2.1.1.4 Plug-In-Hybrid

Die vorgestellten Konzepte verfügen über einen Energiespeicher, der lediglich zur internen Energieaufnahme bestimmt ist und im Grunde als Zwischenspeicher fungiert. Der Kraftstofftank als Hauptenergielieferant des Antriebes ist jenen Konzepten gemein. [14]

Die Nutzung von Plug-In-Hybriden sieht vor, die verbaute Fahrzeugbatterie über das Stromnetz extern aufzuladen. Die elektrische Energie zum Laden der Hochleistungsbatterie muss folglich nicht innerhalb des Fahrzeugs generatorisch erzeugt werden. Hier ist also erstmals eine entsprechende externe Ladeinfrastruktur erforderlich, um derartige Fahrzeuge mit elektrischer Energie versorgen zu können. Das Konzept ist als Mischform aus autarkem Hybrid und reinem batterieelektrischen Fahrzeug einzustufen. Im Allgemeinen knüpfen derartige Fahrzeuge jedoch an Voll-Hybrid-Fahrzeuge an und entsprechen somit deren beschriebenen Strukturen. [12, 16]

Zwei Einordnungen spielen im Bereich der Plug-In-Hybride eine Rolle: PHEV mit geringem Elektrifizierungsgrad und PHEV mit Range Extender. Gering elektrifizierte Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge bieten die Möglichkeit, beide Motoren flexibel einzusetzen. Dabei kann beispielsweise bei kürzeren Strecken im Stadtverkehr, wo die Fahrleistungen im Allgemeinen moderaten Anforderungen unterliegen, der Elektromotor als alleinige Antriebsquelle genutzt werden. Werden höhere Leistungen gefordert und die Leistungsfähigkeit des Elektromotors überschritten, wird das Fahrzeug zusätzlich vom Benzin- oder Dieselmotor angetrieben. Es kommt zu einer Leistungsaddition (z. B. bei Überholvorgängen). Das elektrische Betriebsverhalten ist wesentlich durch die Dimensionierung der Leistungselektronik, des Elektromotors und der Batterie sowie das thermische Verhalten dieser Komponenten bestimmt. [16]

Im Allgemeinen entsprechen Plug-In-Hybride mit Range Extender reinen batterieelektrischen Fahrzeugen und werden ausschließlich von einem Elektromotor angetrieben. Im Gegensatz zu PHEV mit niedrigem Elektrifizierungsgrad werden die elektrischen Komponenten sämtlichen Leistungsanforderungen gerecht. Das Konzept basiert jedoch zusätzlich auf der Möglichkeit, mittels einer verbauten Generator- und Ladeeinheit die Reichweite des Fahrzeuges zu erhöhen. In den meisten Fällen kommt dabei ein konventioneller Verbrennungsmotor zum Einsatz, wobei auch andere Systeme in Frage kommen (2-Takt-Motoren, Rotationskolbenmotoren, Turbinen, Brennstoffzellen etc.). Der Verbrennungsmotor muss bei hohen Lasten nicht unterstützend eingreifen und startet erst, wenn die Batteriekapazität einen Schwellwert unterschreitet (Charge-Depleting, Charge-Sustaining). So können beispielsweise serielle Hybridstrukturen realisiert werden, in denen der Verbrennungsmotor als Nachladeeinheit über keine mechanische Verbindung zum Antriebsstrang verfügt. Daneben sind auch Systeme mit mechanischem Durchtrieb denkbar. [14, 16]

Plug-In-Hybride stellen mit ihrem bereits sehr hohen Elektrifizierungsgrad die Schnittstelle zu den reinen batterieelektrischen Fahrzeugen her. Auf kürzeren Strecken oder im Stadtverkehr kann das Fahrzeug vollständig lokal emissionsfrei vom Elektromotor angetrieben werden und somit einen emissionsfreien Verkehr im innerstädtischen Betrieb gewährleisten (Umweltzone bzw. Niedrig-Emissions-Gebiete). Auf längeren Strecken sorgt der Range Extender, meist in Form eines herkömmlichen Verbrennungsmotors, dafür, dass höhere Reichweiten erzielt werden können. Zusammenfassend kann der Plug-In-Hybrid als höchste Hybridisierungsstufe als Brückentechnologie zum batterieelektrischen Fahrzeug eingestuft werden, nicht zuletzt auch aus Kostensicht. [16]

2.1.2 Batterieelektrische Fahrzeuge

Mithilfe der beschriebenen Fahrzeugkonzepte kann bereits ein wesentlicher Beitrag zur Umwelt- und Ressourcenschonung geleistet werden (z. B. durch teilweises elektrisches Fortbewegen). Dennoch ist ein rein elektrisches Fortbewegen mithilfe eines Hybrid-Fahrzeuges nicht zu jeder Zeit zu bewerkstelligen. Ein vielversprechendes Konzept stellt folglich das vollständig elektrifizierte, batteriebetriebene Fahrzeug dar.

Die schematische Darstellung eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeuges in der Ausführung mit einem zentral genutzten Elektromotor zeigt **Abbildung 2.3**.

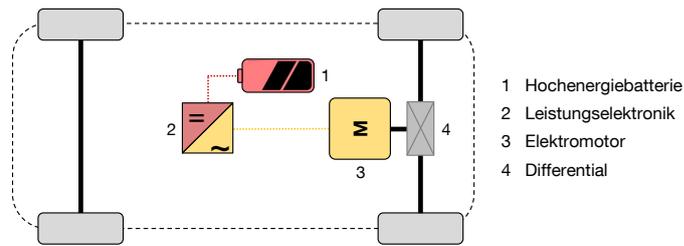


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines batterieelektrischen Fahrzeuges, eigene Darstellung nach [14]

Neben gezeigter Variante sind weitere Konzepte, die z. B. über Radnabenmotoren verfügen und sogar ein Differential überflüssig machen, denkbar. Im Generellen sind Elektrofahrzeuge verglichen zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen verhältnismäßig einfach strukturiert. Der Verbrennungsmotor sowie der dazugehörige Tank werden dabei im einfachsten Fall durch eine elektrische Maschine und einen Speicher in Form einer Batterie inklusive Leistungselektronik substituiert (Conversion-Design). [14]

Da auf einen Verbrennungsmotor gänzlich verzichtet wird, kann das Beheizen des Fahrgastraumes in kalten Wintermonaten zu erheblichen Einbußen in der Reichweite führen. Erfolgt die Beheizung des Fahrgastraumes beispielsweise über eine elektrische Widerstandsheizung, deren Energie von der Traktionsbatterie zur Verfügung gestellt werden muss, ist mit Reichweitenreduktionen um durchschnittlich 26 % bzw. mit einem zusätzlichen Energieverbrauch von 5,5 kWh/100 km zu rechnen [17]. Im Falle eines herkömmlichen Fahrzeuges kann die Beheizung ohne zusätzlichen Energieaufwand erfolgen, da der Verbrennungsmotor in der Regel genügend Motor- bzw. Verlustwärme zur Verfügung stellt.

Unter dem Aspekt der Ladeinfrastruktur stellen reine batteriebetriebene Fahrzeuge die größte Herausforderung dar, da bei entleerter Batterie keine Möglichkeit mehr besteht, das Fahrzeug weiter zu betreiben. Eine geeignete Ladeinfrastruktur muss also hinsichtlich der Versorgungssicherheit verfügbar gemacht werden. Die Realisierung einer solchen hängt zudem von den Strukturen ab, in denen sich das Fahrzeug üblicherweise bewegt (z. B. Megastadt, ländlicher Raum). Grundsätzlich kann aber festgehalten werden, dass bereits jetzt durch die vorhandene flächendeckende elektrische Infrastruktur (z. B. in Gebäuden) ein Aufladen der Fahrzeugbatterien möglich wäre. Im Vergleich dazu würde der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur größere Investitionen nach sich ziehen [12].

Eines der größten Hemmnisse von batterieelektrischen Fahrzeugen stellt die Energiespeicherung dar. Heutige am Markt erhältliche Fahrzeuge weisen eine übliche Reichweite von durchschnittlich 165 km (Mittelwert der Hersteller-Werksangaben) unter Idealbedingungen auf. Dieser Aspekt wird von potentiellen Käufern als Hürde angesehen, obwohl für alltägliche Fahrten die aktuellen Reichweiten mehr als ausreichend sind, wie im späteren Verlauf der Arbeit noch deutlich wird. Somit wird das technische Problem der begrenzten Reichweite viel mehr zu einem psychologischen Gesichtspunkt [12, 14]. Akzeptable und herkömmlichen Fahrzeugen ebenbürtige Reichweiten lassen sich jedoch nur durch höhere Energiedichten erzielen. Dazu sind Fortschritte in der Batterieforschung nötig.

2.1.3 Brennstoffzellenfahrzeuge

Um Brennstoffzellenfahrzeuge anzutreiben, verfügen sie über einen sogenannten Brennstoffzellenstack, in dem durch einen elektrochemischen Umwandlungsprozess Energie erzeugt wird. Chemische Energie wird dabei direkt in elektrische Energie transformiert, ohne den Umweg über Wärmeenergie oder mechanischer Energie zu gehen. Die beiden Reaktanden Wasserstoff und Sauerstoff reagieren miteinander, elektrische Energie und Wasser entstehen. Die freigesetzte elektrische Energie kann anschließend in einem Energiespeicher (z. B. einer Batterie) zwischengespeichert werden, der den Elektromotor des Fahrzeuges antreibt. Zur Bereitstellung des notwendigen Sauerstoffs kommt üblicherweise Umgebungsluft zum Einsatz. Wasserstoff als zweiter Reaktand wird vorwiegend in Wasserstofftanks im Fahrzeug mitgeführt, kann aber auch an Bord des Fahrzeuges mittels Reformers aus Erdgas oder Methanol erzeugt werden. [1]

Der schematische Aufbau eines Brennstoffzellenfahrzeuges ist **Abbildung 2.4** zu entnehmen.

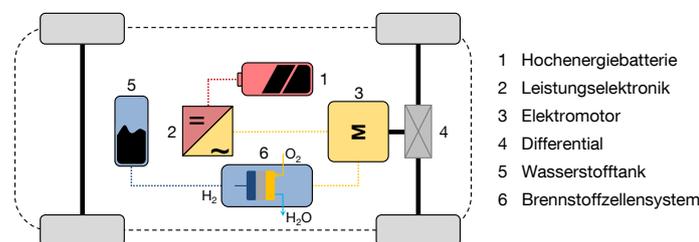


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Brennstoffzellenfahrzeuges

Zusätzlich zur Hochvoltbatterie, die als Energiespeicher für den Elektromotor zur Verfügung steht, kann die Brennstoffzelle elektrische Energie zum Antrieb des Fahrzeuges liefern. Der notwendige Wasserstoff wird dabei in Drucktanks mit 350 bis

über 700 bar im Fahrzeug mitgeführt [14]. Gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen haben Brennstoffzellenfahrzeuge als Alternative bzw. ergänzende Antriebstechnologie den Vorteil, ähnlich herkömmlicher Fahrzeuge relativ schnell (mit Wasserstoff) betankt werden zu können und über vergleichsweise hohe Reichweiten zu verfügen. Die Existenz einer entsprechenden Tankstelleninfrastruktur ist jedoch Voraussetzung. Eine flächendeckende Versorgung ist in Deutschland derzeit nicht vorhanden.

Mit dem Toyota Mirai wurde im Dezember 2014 das weltweit erste in Großserie produzierte Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeug vorgestellt und steht seitdem in Japan, den USA und Europa zum Verkauf. Es verfügt über eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von 3,1 kW und soll bezüglich der Reichweite verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen nicht unterlegen sein. Brennstoffzellenantriebe beschäftigen Toyota schon seit mehr als 20 Jahren. [18] Auch Mercedes-Benz will das ursprünglich für 2014 geplante Brennstoffzellenfahrzeug B-Klasse F-Cell nun 2017 auf den Markt bringen [19].

2.2 Energiespeicherung

Innovative Antriebskonzepte und der Einsatz von elektrischer Energie zur Traktion von Fahrzeugen mittels einer elektrischen Antriebsmaschine erfordern neben dem Energiewandler entsprechende Energiespeichersysteme. Eingesetzt werden können dazu verschiedene Batteriespeicher oder aber auch Brennstoffzellensysteme, die eine direkte Verwendung der erzeugten elektrischen Energie im Elektromotor zulassen. In den folgenden Ausführungen wird auf die derzeit für den Einsatz in der Elektromobilität favorisierten Batterietechnologien, neuartige Batteriekonzepte sowie das Prinzip der Brennstoffzelle näher eingegangen.

2.2.1 Batterietechnologien

Zur Elektrotraktion können wiederaufladbare Sekundärzellen (Akkumulatoren) Anwendung finden, die reversible elektrochemische Prozesse zulassen (Entlade- und Ladevorgang). Diese unterscheiden sich durch die verwendeten Anoden- und Kathodenmaterialien, Elektrolyte oder Betriebstemperaturen [20, 21]. Je nach Anforderungen, die ein entsprechendes Elektrofahrzeug zu erfüllen hat, können unterschiedliche Batteriesysteme als Energiespeicher eingesetzt werden. Elektrochemische Energiespeicher werden durch ihre Energie- und Leistungsdichten charakterisiert.

In **Abbildung 2.5** werden unterschiedliche Energiespeichersysteme in einem sogenannten Ragone-Diagramm einem Vergleich unterzogen. Die spezifische Leistung in

W/kg einer Batterietechnologie wird dabei zur Energiedichte in Wh/kg in Beziehung gesetzt. Die Batterien können somit in Hochleistungs- und Hochenergiezellen eingeteilt werden. Der Einsatz eines Systems hängt von der gewünschten Auslegung des Fahrzeuges und vom jeweiligen Nutzerprofil ab. Einerseits muss der Elektromotor hohe Leistungen auch ohne Unterstützung des Verbrennungsmotors liefern können (z. B. Beschleunigung bei Hybridfahrzeugen: Einsatz einer Hochleistungszelle), auf der anderen Seite sind zur Erreichung alltagstauglicher Reichweiten z. B. bei batterieelektrischen Fahrzeugen höchstmögliche Energiedichten wünschenswert (Einsatz einer Hochenergiezelle). [12]

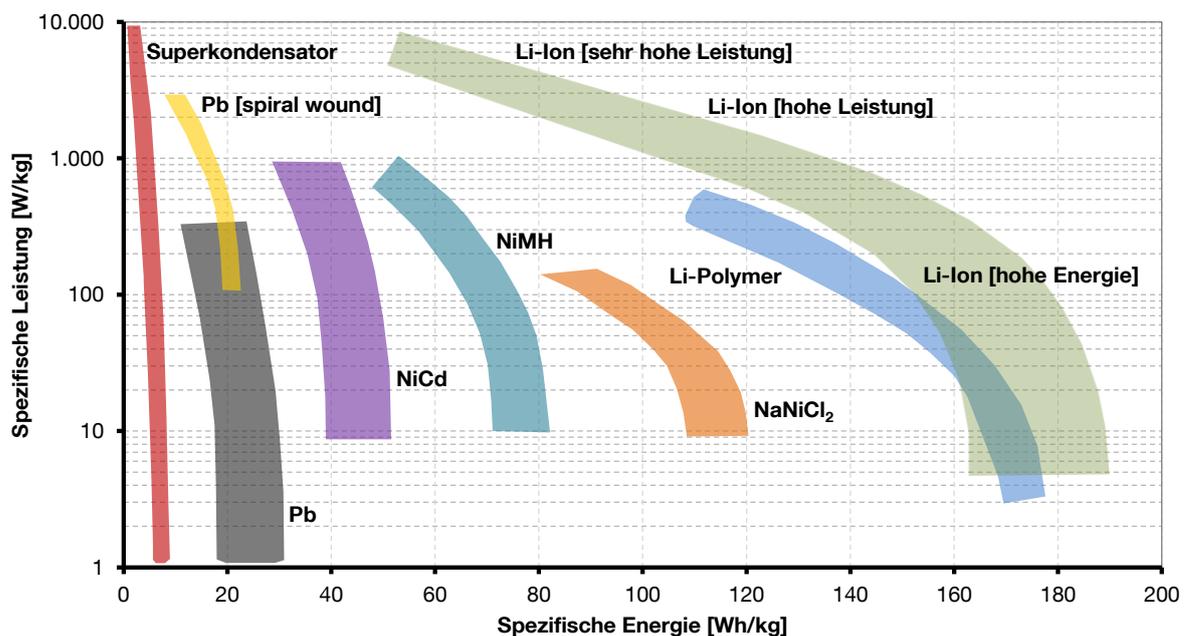


Abbildung 2.5: Ragone-Diagramm: Energie- und Leistungsdichten von Energiespeichern auf Zellebene, eigene Darstellung nach [12]

Es ist festzustellen, dass vor allem Lithium-Ionen-Zellen (Li-Ion) und Lithium-Polymer-Zellen (Li-Polymer) je nach Ausführung eine große Bandbreite an spezifischen Energien sowie spezifischen Leistungen abdecken können und damit in der Elektromobilität vielseitig einsetzbar sind. Weitere gängige Batterietypen basieren auf einer Blei- (Pb), Nickel-Cadmium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Natrium-Nickelchlorid-Technologie (NaNiCl₂).

Neben der Steigerung der Energie- und Leistungsdichte sind bei der Auswahl eines Batteriesystems zur Elektrotraktion zukünftig weitere Aspekte in den Entscheidungsprozess miteinzubeziehen. Dazu zählen Sicherheit, Kosten, Lebensdauer und Zyklenbeständigkeit der Batterie [12].

2.2.1.1 Lithium-Ionen-Batterien

Aufgrund verhältnismäßig hoher Energie- und Leistungsdichten (Abbildung 2.5) sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren in der Lage, eine große Bandbreite in (auto-)mobilen Anwendungen abzudecken. Sie stehen deshalb derzeit im Hauptfokus der Batterieforschung für den elektromobilen Einsatz. Im Bereich der Konsumelektronik ist diese Technologie bereits Standard. Im Gegensatz zu den ebenfalls in Elektrofahrzeugen häufig eingesetzten Nickel-Metallhydrid-Batterien kann bei Verwendung der Li-Ion-Technologie bei gleicher Energiedichte eine Volumeneinsparung von etwa 30 % sowie eine Masseneinsparung von bis zu 50 % erreicht werden. Weitere Vorteile gegenüber NiMH-Systemen sind schnellere Ladevorgänge, eine höhere Lebensdauer sowie gesteigerte Leistungsdichten. Die hohe Zyklenfestigkeit sowie die geringe Selbstentladung sind als weitere Vorteile anzusehen. [12]

Über die Materialauswahl für Anode, Kathode und Elektrolyt lassen sich grundsätzlich die Leistungs- und Energiedichte des Batteriesystems beeinflussen. Kommerziell verfügbare Lithium-Ionen-Akkumulatoren besitzen meist eine Anode aus amorphem Kohlenstoff, dessen benötigte Menge durch den Einsatz von Graphit reduziert werden kann. Sehr hohe Energiedichten bei jedoch sehr geringen Leistungsdichten zeigen z. B. Lithium-Nickel-Kobalt-Batterien, während Batterien mit einer Lithium-Titanat-Anode mit relativ hohen spezifischen Leistungen punkten können und dabei schnellladefähig sind. Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4) als Kathodenmaterial führt sowohl zu akzeptablen spezifischen Leistungs- als auch Energiedichten und ist außerdem in puncto Kosten, Zyklenfestigkeit, Sicherheit und Ladezeiten als positiv einzustufen. Führende Batteriehersteller und vor allem Hersteller in China setzen auf diesen Batterietyp als Traktionsbatterie für batterieelektrische Fahrzeuge. [12, 20–22]

Neben der Weiterentwicklung und Optimierung bekannter und bereits verfügbarer Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind weitere lithiumbasierte Technologien Gegenstand der aktuellen Forschung und potentielle Kandidaten für den zukünftigen Einsatz in Elektrofahrzeugen. Sie werden als Post-Lithium-Ionen-Batterien oder lithiumbasierte Akkumulatoren der vierten Generation bezeichnet und werden im Folgenden kurz diskutiert [12, 20–22]:

Wie Abbildung 2.5 zeigt, kann mit Lithium-Polymer-Akkumulatoren eine ähnlich hohe Energiedichte wie mit herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien erzielt werden. Der Unterschied dieser beiden Systeme besteht in der Form des Elektrolyten, der bei Lithium-Polymer-Batterien als flexible und trockene Polymerfolie ausgeführt ist. Die-

se Folie erreicht jedoch erst bei Temperaturen ab 60 °C eine ausreichende Ionenleitfähigkeit, sodass zusätzlich ein Gel zum Einsatz kommt. Aufgrund höherer Kosten konnte sich dieses Konzept bisher noch nicht durchsetzen.

Mit einer mittelfristigen Realisierung von Lithium-Feststoff-Akkumulatoren (Verwendung von Keramiken) wird bis 2020 gerechnet. Ein wesentlicher Vorteil dieses Systems stellt insbesondere die Sicherheit dar. Diese Technologie erweist sich als sehr robust gegenüber Hitze und arbeitet selbst bei Temperaturen um 100 °C, wo Lithium-Polymer und Lithium-Ionen-Batterien längst ihren Arbeitsbereich verlassen, noch zuverlässig. Dies macht eine zusätzliche Kühlung unnötig und führt somit zu Reduzierungen beim Platzbedarf.

Lithium-Schwefel-Akkumulatoren als weitere Alternative werden deutlich später als 2020 erwartet. Sie sind umweltfreundlicher und leistungsfähiger als herkömmliche Li-Ion-Systeme, weisen jedoch noch hohe Sicherheitsmängel sowie eine geringe Lebensdauer auf. Die Anode wird aus Schwefel oder einer Schwefelverbindung ausgeführt, was theoretisch eine um den Faktor drei bis vier höhere spezifische Energie gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Systemen ermöglicht.

Bis nach 2030 könnte die Realisierung eines Lithium-Luft-Akkumulators abgeschlossen sein. Die Kathode dieser Batterie wird dabei aus Kohlenstoff gefertigt, welcher eine poröse und luftdurchlässige Struktur aufweist. Die Anode besteht aus metallischem Lithium. Die Kapazität dieser Batterie ist abhängig von der Anodengröße, da die Luft aus der Umgebung entnommen werden kann. Gerechnet wird mit sieben bis zehn Mal höheren Energiedichten im Vergleich zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Dieses System kann als Optimum in Bezug auf die Energiedichte bei lithiumbasierten Technologien angesehen werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass Lithium-Ionen-Systeme derzeit die Technologie mit dem zukünftig größten Potential für den Einsatz in der Automobilindustrie darstellen. Aktuell werden jedoch lediglich Energiedichten zwischen 170-200 Wh/kg auf Zellebene sowie Leistungsdichten von 800 bis 1.000 W/kg realisiert [12].

Die zukünftige technologische Weiterentwicklung von Batteriesystemen auf Lithium-Ionen-Basis wird in **Abbildung 2.6** visualisiert.

Theoretisch könnten in der Zukunft über 500 Wh/kg an Leistungsdichte auf Zellebene erzielt werden, die jedoch durch die Begrenzung des technischen Potentials limitiert werden. Hinzu kommt ein zusätzliches Systemgewicht für Gehäuse, Anschlüsse

und Überwachungssysteme, das die Masse des Gesamtsystems in die Höhe treibt. Zukünftig ist jedoch mit einer Reduktion des zusätzlichen Systemgewichtes auf etwa 20 % im Jahr 2020 zu rechnen. [12]

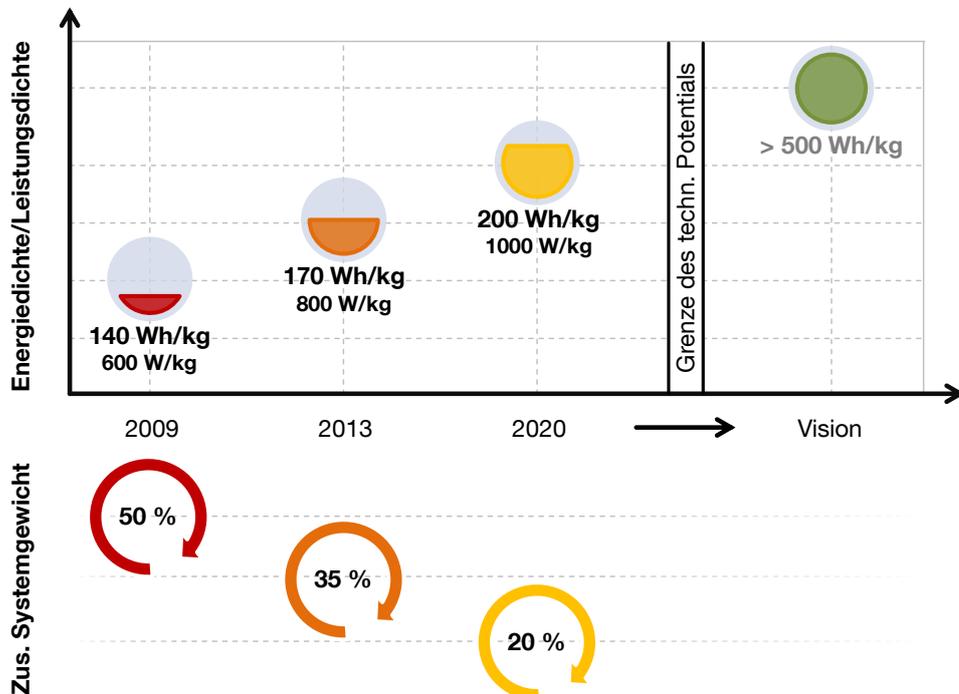


Abbildung 2.6: Zukünftige technologische Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, eigene Darstellung nach [12]

Auch wenn sie sich technisch noch nicht auf demselben Stand von NiCd- oder Pb-Batterien befinden, sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren derzeit das am meisten beforschte System für den zukünftigen elektromobilen Einsatz. Die Energiedichten herkömmlicher Energieträger wie beispielsweise Benzin mit 12 kWh/kg machen jedoch deutlich, dass Batterien diesbezüglich noch keine Konkurrenz zu flüssigen Energieträgern darstellen. Um den Erfolg von Elektrofahrzeugen in der Zukunft zu gewährleisten, besteht auf dem Gebiet der Batterietechnologie zukünftig weiterhin erheblicher Forschungsbedarf. [12]

2.2.1.2 Weitere und neuartige Batteriekonzepte

Neben oben beschriebener Lithium-Ionen-Batterien sollen in diesem Kapitel weitere, bereits kommerziell verfügbare sowie neuartige Überlegungen und Konzeptionen von Batterie-Technologien für die Elektrotraktion kurz dargestellt werden.

Als Starterbatterie in herkömmlichen Diesel- und Benzinfahrzeugen werden vorwiegend Blei-Säure-Akkumulatoren eingesetzt. Zur Elektrotraktion spielen sie allerdings

wegen der geringen erzielbaren Energiedichte keine wesentliche Rolle. Darüber hinaus sind sie jedoch aufgrund geringer Herstellungskosten durchaus zur Anwendung in kleineren, leistungsschwächeren Elektrofahrzeugen (oder kostengünstigen Fahrzeugen für Schwellenländer) denkbar. Blei-Akkumulatoren gelten als technologisch gänzlich ausgereizt, Weiterentwicklungen hinsichtlich Gel- und Vlieskonzepten werden jedoch durchgeführt. [12, 20–22]

Die ebenfalls als ausgereift geltende NiCd-Technologie kann sehr gute Schnellladeeigenschaften, hohe Lebensdauern und geringe Herstellungskosten vorweisen. Ihre Nachteile liegen jedoch in der vergleichsweise niedrigen Energiedichte, im hohen Wartungsaufwand, in der hohen Selbstentladung sowie im auftretenden Memory-Effekt. Schwerwiegender als die vorgenannten Nachteile wirkt jedoch die aufwendige Entsorgung, die aufgrund der giftigen und umweltschädlichen Substanzen (und Bestandteile) in der Batterie notwendig wird. [12]

Die Batterietechnologie der NiMH-Akkumulatoren findet als Standardsystem derzeit hauptsächlich in Hybridfahrzeugen Anwendung (z .B. im Toyota Prius). Gegenüber Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren werden die verwendeten Substanzen als ungiftig eingestuft. Gleichzeitig sind eine gesteigerte Energiedichte sowie eine bessere Zyklenfestigkeit festzustellen. Nachteilig wirkt sich dagegen eine relativ geringe Lebensdauer der Batterie aus. Weitere Nachteile wie eine Überempfindlichkeit gegenüber Polung, Überladung oder Tiefenentladung macht den vermehrten Einsatz dieses Systems in Elektrofahrzeugen problematisch. Zudem kann die NiMH-Technologie nur in einem definierten Temperaturbereich betrieben werden. [12, 20–22]

NaNiCl₂-Akkumulatoren (auch ZEBRA [Zero Emission Battery Research Activities]) ist eine Hochtemperaturzelle (ca. 300 °C), die hohe Energiedichten aufweist und Wartungsfreiheit vorweisen kann. Zudem lässt sich eine vollständige Rezyklierbarkeit der beiden Ausgangsstoffe Nickel und Kochsalz realisieren. Die geringe Leistungsdichte ist jedoch nachteilig anzusehen. Weiterhin müssen die Zellen dieses Systems permanent auf Betriebstemperatur gehalten werden, was zu einer vergleichsweise hohen Selbstentladung führt (Entnahme der dafür notwendigen Energie aus der Batterie selbst). Die geringe Lebensdauer ist ein weiterer Kritikpunkt dieses Batterietyps. [12]

Gegenstand der aktuellen Forschung sind außerdem neuartige Batteriesysteme wie die Redox-Flow-Batterie, auch Flüssigbatterie oder Nasszelle genannt. Bei dieser Batterie werden zwei flüssige Elektrolyte in verschiedenen Kreisläufen genutzt. Dies bringt die Vorteile eines sehr schnellen Nachladens (Tankens), indem die verbrauch-

ten Elektrolyte ausgetauscht werden. Auf eine entsprechende Ladeinfrastruktur, wie sie bei anderen Batteriesystemen notwendig ist, kann hierbei verzichtet werden. Aktuell eignen sich jedoch Redox-Flow-Batterien lediglich für große, stationäre Anwendungen (z. B. Mobilfunk-Basisstationen, Pufferstationen für Windkraftanlagen) und sind noch nicht für die Elektrotraktion verwendbar. Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Zellen ist von einer reduzierten Leistungsdichte auszugehen. [12, 20–22]

Innovative Überlegungen zu neuen Batterien, die nicht lithumbasiert sind, betreffen ferner Metall-Luft-Systeme, für welche Metalle wie Zink, Aluminium oder Magnesium zum Einsatz kommen. Theoretisch sind mit diesen Systemen die höchsten Energiedichten aller Batterien überhaupt möglich. Die Tatsache, dass es sich dabei aber um Primärbatterien handelt, die nicht wiederaufladbar sind, schränkt deren Anwendung derzeit jedoch noch ein. Die Brennstoffe müssen bei Metall-Luft-Systemen mechanisch ausgetauscht werden, was Ähnlichkeiten zu einer Redox-Flow-Batterie oder einer Brennstoffzelle aufweist. Eine Realisierung unter Verwendung von Zink (auch mit elektrischer Nachladung) wird von der Fachwelt bis zum Jahr 2025 erwartet. Die Zukunft von Magnesium-Luft oder Aluminium-Luft-Zellen ist derzeit noch nicht abzuschätzen. [20–22]

2.2.2 Brennstoffzelle

Das von Schönbein und Grove 1840 entdeckte Prinzip der Brennstoffzelle [23] beruht auf der Verstromung von Wasserstoff durch elektrochemische Vorgänge (vergleichbar der Vorgehensweisen in einer Batterie). Dabei wird die im Wasserstoff gebundene chemische Energie ohne den Umweg über Wärme direkt in elektrische Energie umgewandelt. Brennstoffzellen sind jedoch keine Energiespeicher, sondern erfüllen die Funktion eines Energiewandlers.

Brennstoffzellen sind aus einer Sauerstoff- und einer Brennstoffelektrode aufgebaut. Zwischen den Elektroden, die elektronenleitend ausgeführt sind, befindet sich ein ionenleitender fester oder flüssiger Elektrolyt (z. B. Säure oder Lauge). Diese Komponenten bilden zusammen als Einheit das Herzstück einer Brennstoffzelle. Dort finden im Inneren der Zelle an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt die elektrochemischen Reaktionen statt, wodurch elektrischer Strom erzeugt wird. Mehrere Gruppen von Brennstoffzellen werden je nach Materialbeschaffenheit des Elektrolyten unterschieden. Gemäß ihrer Arbeitstemperatur lassen sie sich in Niedertemperatur-, Mitteltemperatur- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen einteilen. Zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen zählen [23, 24]:

- Alkalische Brennstoffzellen (AFC) [20 °C-90 °C]: Einsatz in der Raumfahrt (APOLLO-Mission) und für Sonderanwendungen
- Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEFC) [20 °C-80 °C]: Einsatz für mobile Anwendungen und vorwiegend in der Automobilindustrie
- Phosphorsaure Brennstoffzellen (PAFC) [180 °C-220 °C]: Einsatz für die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind [23, 24]:

- Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC) [650 °C-700 °C]: Einsatz in Kraftwerken und für die KWK
- Oxidkeramische Brennstoffzellen (SOFC) [750 °C-1.000 °C]: Einsatz in Kraftwerken und für die KWK

Unter den beschriebenen Brennstoffzellentypen wird die PEFC in der aktuellen Entwicklung und Forschung aufgrund ihres großen Anwendungspotentials und Robustheit favorisiert (z. B. auch Einsatz in der B-Klasse F-Cell von Mercedes-Benz). PEFC-Systeme weisen hohe Leistungsdichten von 0,1 bis 0,6 W/cm² bei gleichzeitig niedrigen Betriebstemperaturen auf und tragen durch Ihre Umweltverträglichkeit zum Ressourcenschutz bei (keine Altlasten, kein Lärm etc.) [23].

Abbildung 2.7 visualisiert den schematischen Aufbau einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle und beschreibt zudem die ablaufenden elektrochemischen Reaktionen.

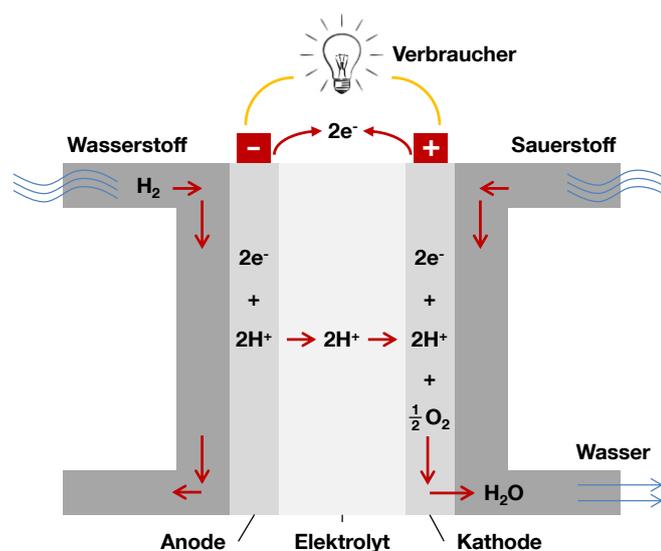


Abbildung 2.7: Funktionsprinzip von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen, eigene Darstellung nach [25]

Die PEFC gilt als technisch ausgereift und kommt verstärkt in Brennstoffzellenfahrzeugen zum Einsatz. Die skizzierte Ausführung einer Brennstoffzelle zeigt als wesentliche Komponente die sogenannte Membran-Elektroden-Einheit (MEE), bestehend aus einer Elektrolytfolie bzw. Polymermembran mit Anode und Kathode aus Kohlenstoff. Auf die porösen aktiven Schichten (Elektroden) wird zum Zwecke effizienterer und schnellerer Reaktionsabläufe ein Katalysator in Form von fein verteiltem Platin aufgebracht. Der Elektrolyt respektive die Polymermembran trennt die beiden Reaktanden Wasserstoff und Sauerstoff räumlich voneinander. An die Elektroden anschließend folgen sogenannte poröse Stützstrukturen (Gasdiffusionslagen), deren Aufgabe es ist, die Ausgangsstoffe Wasserstoff und Sauerstoff fein über die Elektrodenflächen zu verteilen. Die Zelle wird schließlich von beiden Seiten mit elektrisch leitenden Bipolar- oder Flussfeldplatten abgeschlossen. Über diese Flussfeldplatten werden über eingearbeitete Kanäle die Brennstoffe zu- sowie das Reaktionsprodukt Wasser abgeführt. [20, 23]

Die vergleichsweise komplexen Vorgänge innerhalb der Membran-Elektroden-Einheit der Brennstoffzelle können anhand Abbildung 2.7 beschrieben werden.

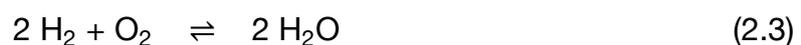
Zunächst ist eine Oxidation (Elektronenabgabe) von Wasserstoff auf der Anodenseite festzustellen. Elektronen werden über den äußeren Stromkreis verschoben, während Wasserstoffionen durch die protonenleitende Membran auf die Kathodenseite wandern. Diese Reaktion wird durch Gleichung (2.1) beschrieben:



Auf der Kathodenseite erfolgt eine Reduktion oder Elektronenaufnahme von Sauerstoff. Das entstehende Produktwasser verlässt durch das Abgas die Zelle. Die Reduktion ist in Gleichung (2.2) zusammengefasst:



Insgesamt ist in Gleichung (2.3) eine Redoxreaktion als Zellreaktion im Gesamtsystem festzustellen:



Bei Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen liegt die maximal mögliche Zellspannung (reversibles Zellpotential), die unter Standardbedingungen (298 K, 1.013 mbar) erreichbar ist, bei $E_0 = E_{\text{Kathode}} - E_{\text{Anode}} = 1,23 \text{ V}$. Aufgrund von Aktivierungs-, Wider-

stands- und Diffusionsüberpotentialen (Verluste) erreichen PEFC aber lediglich Zellspannungen von etwa 1,0 V. Thermodynamische Gründe beschränken darüber hinaus den Anteil der Reaktionswärme, der in elektrische Energie umgesetzt werden kann. Dieser maximal mögliche Anteil wird durch die freie Enthalpie oder Gibb'sche Energie ΔG beschrieben. Würden die elektrochemischen Reaktionen reversibel ablaufen, könnte die gesamte Reaktionswärme vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden. So jedoch beträgt der maximale theoretische Wirkungsgrad des elektrochemischen Umwandlungsprozesses lediglich $\eta_{\text{ideal}} = 83 \%$. Der elektrische Wirkungsgrad auf Zellebene liegt derzeit zwischen 50 % und 68 %. [23]

Für den Einsatz im Fahrzeug werden meist mehrere Einzelzellen zu einem sogenannten Brennstoffzellenstack zusammengeschaltet. Die hohe Energiedichte dieser Stacks erlaubt eine kompakte Bauform. Für den optimalen Betrieb des Systems sind zusätzlich noch die Peripherie bestehend aus Pumpen, Kompressoren, Heizung und Kühlung, ein Wechselrichter und der elektrische Antrieb erforderlich. Insgesamt kann für die PEFC derzeit von einer Lebensdauer zwischen 1.700 und 2.000 Betriebsstunden ausgegangen werden. Dies entspricht einer Fahrleistung von rund 100.000 km. Für zukünftige Zellentwicklungen werden sogar 5.000 Betriebsstunden Lebensdauer erwartet. Da die Lebensdauer in hohem Maße von der Betriebsweise der Brennstoffzelle abhängig ist (Ein- und Ausschaltvorgänge), kann ein optimierter Einsatz die Lebensdauer auf bis zu 12.000 Betriebsstunden steigern. [20, 26]

Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystemen sind auf eine Tankstelleninfrastruktur angewiesen (Kapitel 2.3).

2.3 Versorgungsinfrastrukturen für Fahrzeuge

Sämtliche Antriebstechnologien sind durch die notwendige Aufnahme von Treibstoff (konventionelle Fahrzeuge) oder elektrischem Strom (z. B. batterieelektrische Fahrzeuge) auf entsprechende Versorgungsinfrastrukturen angewiesen. Unterschieden werden dabei herkömmliche Konzepte, die für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge relevant sind, und innovative Infrastruktureinrichtungen, die alternativen Antriebskonzepten die Möglichkeit bieten, (elektrische) Energie aufzunehmen. Dieses Kapitel beschreibt die allgemeine Situation von Versorgungsinfrastrukturen und gibt einen Überblick über den Ausbauzustand der Ladeinfrastruktur in Deutschland und der Welt.

2.3.1 Herkömmliche Konzepte

Als herkömmliche Konzepte werden Versorgungsinfrastrukturen bezeichnet, die konventionelle Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel an Tankstellen über Zapfsäulen für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge anbieten. Darüber hinaus zählen ebenfalls die Kraftstoffe Flüssiggas in Form von LPG (Liquefied Petroleum Gas), Erdgas in den Formen CNG (Compressed Natural Gas) und LNG (Liquefied Natural Gas) oder Wasserstoff zu den herkömmlichen Konzepten. Die Verwendung von LNG und Wasserstoff stellen jedoch besondere Anforderungen an die Infrastruktur.

Mit dem Siegeszug des Automobils setzte ein verstärkter Bedarf an Treibstoffen ein. Der Handel mit Kraftstoffen begann. Die erste Tankstelle weltweit wurde 1907 in Seattle, USA in Betrieb genommen. Doch erst einige Jahre später in den 1920er Jahren begann der verstärkte Aufbau eines Tankstellennetzes in Deutschland und Amerika. Bis dahin war es üblich, Treibstoff von Drogerien oder Kolonialwarenhändlern in Benzinkannen aus Fässern abgefüllt zu beziehen. Die Methode, Treibstoff mit Wagen von Haus zu Haus zu fahren, setzte sich aufgrund von Zwischenfällen und häufigen Explosionen von Tankwagen nicht durch. [27]

Bis Ende der 20er Jahre stieg vor allem in Amerika die Zahl der Verkaufsstellen für Treibstoffe rapide an. 1929 waren bereits 143.000 Tankstellen registriert. In Deutschland wurde im Jahre 1930 eine Anzahl von 50.000 Verkaufs- und Tankstellen erreicht. Nachdem im Zweiten Weltkrieg zahlreiche Anlagen zerstört worden waren, starteten Ende der 1940er Jahre Planungen der Mineralölindustrie zum Aufbau neuer Tankstellennetze; diese wurden zudem durch das Wirtschaftswunder (steigende Zahl an Kraftfahrzeugen) begünstigt. Bis 1970 stieg die Zahl der Tankstellen in Deutschland stetig. Die Inbetriebnahme von Selbstbedienungstankstellen, Ölkrisen und steigende Kraftstoffpreise führten schließlich zu Schließungen einer großen Anzahl von Tankstellenbetrieben. Dies bedeutete einen drastischen Rückgang des Bestandes auf die Hälfte bis Anfang der 1980er Jahre. [27, 28]

Die Entwicklung des Tankstellen- sowie des Fahrzeugbestandes in Deutschland ist in **Abbildung 2.8** in der Zeitreihe von 1950 bis 2015 dargestellt.

In Deutschland werden grundsätzlich Bundesautobahntankstellen mit Ein- und Ausfahrten auf Bundesautobahnen, die mit etwa 350 nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtanzahl ausmachen, und Straßentankstellen, deren Ein- und Ausfahrten an öffentlichen Straßen, aber nicht auf Bundesautobahnen liegen, unterschieden [29].

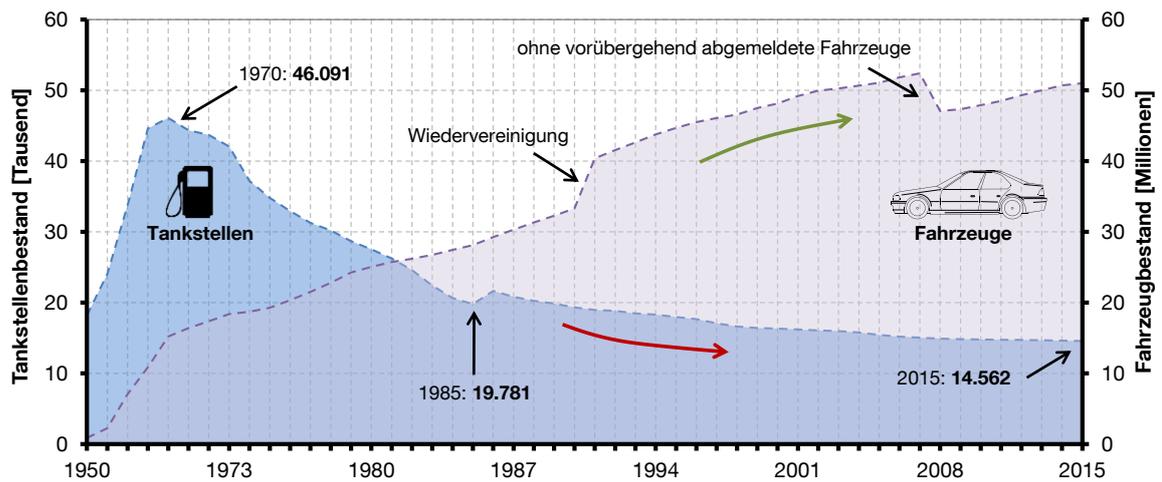


Abbildung 2.8: Entwicklung des Tankstellen- und Fahrzeugbestandes in Deutschland (Daten: [30, 31])

Der Höchststand ist mit über 46.000 registrierten Tankstellen im Jahr 1970 festzustellen. Seitdem ist aufgrund des gestiegenen Wettbewerbsdrucks innerhalb der Branche ein kontinuierlicher Rückgang zu beobachten. Vor allem dürfte der Rückgang vor dem Hintergrund des demografischen Wandels in den ländlichen Räumen zu spüren sein. Insgesamt existieren in Deutschland derzeit noch etwa 14.500 Tankstellen, wobei sich eine Stabilisierung des Bestandes abzeichnet. Gleichzeitig ist jedoch seit den 1950er Jahren die Entwicklung des Fahrzeugbestandes (Pkw, Zweiräder, Lkw) einem stetigen Anstieg unterworfen, was einen signifikanten Rückgang der Tankstellendichte in Deutschland zur Folge hat. Die Einheitengröße jedoch nimmt über die Jahre aufgrund eines Konsolidierungstrends immer weiter zu. [29, 32]

Auf europäischer Ebene verfügt Deutschland über eines der am wenigsten dichten Tankstellennetze. Die Tankstellendichte beträgt lediglich 3,3 Tankstellen (TS) pro 10.000 Fahrzeuge (Fzg) oder 1,8 Tankstellen pro 10.000 Einwohner (EW), zählt dafür aber zu den effizientesten Netzen in Europa. Großbritannien bietet etwa 4 TS/10.000 Fzg (1,9 TS/10.000 EW), gefolgt von Frankreich (4,8 TS/10.000 Fzg; 2,2 TS/10.000 EW) und Italien mit 6,4 TS/10.000 Fzg oder 3,7 TS/10.000 EW. Die Schweiz weist mit 9 TS/10.000 EW (4,5 TS/10.000 Fzg) mit die höchste Tankstellendichte im europäischen Vergleich auf. [32]

Innerhalb Deutschlands kann die Tankstellendichte abhängig vom siedlungsstrukturellen Charakter einzelner Regionen evaluiert werden. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gibt zur Einteilung Deutschlands neun unterschiedliche sogenannte Kreistypen an.

pen an, abhängig von Einwohnerzahlen und Bevölkerungsdichten. Detailliertere Ausführungen zur Klassifizierung von Raum- und Siedlungsstrukturen sind Bestandteil des Kapitels 3.2. Dort wird explizit auf die Möglichkeiten von Raum- und Siedlungsdefinitionen im nationalen und internationalen Kontext eingegangen. Es ist festzustellen, dass in den Kreistypen der Agglomerationsräume insgesamt 50 % aller Straßentankstellen angesiedelt sind (20 % in Kernstädten, 18 % in hochverdichteten Kreisen, 8 % in verdichteten Kreisen und 4 % in ländlichen Kreisen). Auf verstädterte Räume entfallen 36 % der Straßentankstellen (6 % auf Kernstädte, 20 % auf verdichtete Kreise sowie 10 % auf ländliche Kreise). 14 % beanspruchen die ländlichen Räume (9 % für ländliche Kreise höherer Dichte und 5 % für ländliche Kreise geringerer Dichte). Diese Verteilung zeigt, dass sich mit abnehmender Bevölkerungsdichte und Einwohnerzahl die Tankstellendichte reduziert und vor allem die ländlichen Kreise eine verhältnismäßig geringe Dichte aufweisen. Dies ist unter anderem auch den Effekten durch den demografischen Wandel in den peripheren Gegenden Deutschlands und dem Trend zur Konsolidierung von Tankstellenbetrieben geschuldet. [29]

Eine reduzierte Tankstellendichte führt zwangsläufig zu einer Abnahme der Erreichbarkeit dieser Versorgungseinrichtungen. Eine Erreichbarkeitsanalyse liefert Informationen über die spezifische regionale Versorgungssituation. Im bundesdeutschen Durchschnitt liegt die Entfernung zur nächsten Tankstelle bei 5,4 km [29].

Nach Kreistypen des BBSR differenziert, ergibt sich im Hinblick auf die durchschnittliche Erreichbarkeit eine Situation, wie sie in **Abbildung 2.9** dargestellt ist. Die Entfernung, die zur nächsten Tankstelle zurückgelegt werden muss, ist demnach abhängig von der Bevölkerung bzw. der Bevölkerungsdichte.

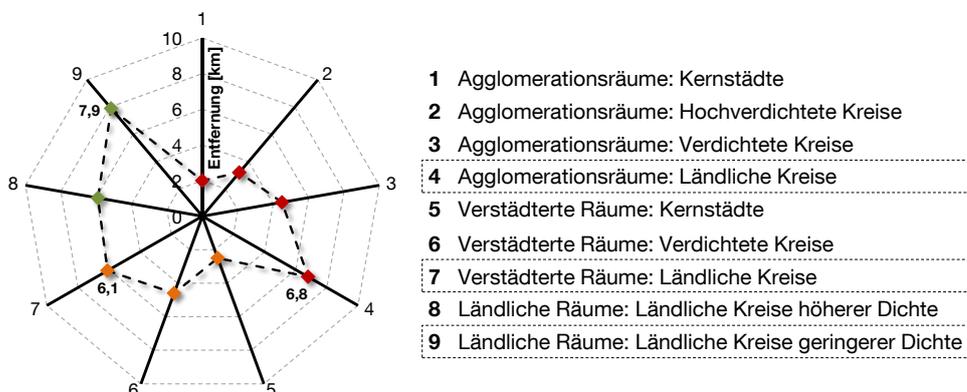


Abbildung 2.9: Mittlere Entfernungen zur nächstgelegenen Tankstelle differenziert nach Kreistypen des BBSR (Daten: [29])

Sie nimmt von Kernstädten in Agglomerationsräumen oder verstädterten Räumen über verdichtete Kreise bis hin zu ländlichen Kreisen immer weiter zu. Eine zunehmende Abgelegenheit sowie der Rückgang der absoluten Bevölkerung einer Region gehen also einher mit einer ansteigenden Entfernung zur nächsten Tankstelle. Die größten Entfernungen sind mit etwa 7,9 km in ländlichen Kreisen geringerer Dichte innerhalb ländlicher Räume festzustellen.

Die Versorgungssituation für herkömmliche Fahrzeuge mit Diesel und Benzin ist – natürlich auch historisch begründet – innerhalb des gesamten Bundesgebietes als sehr gut einzustufen. Auch in entlegeneren Peripheriegebieten (z. B. in ländlichen Kreisen geringerer Dichte) ist es für 96 % der Bevölkerung möglich, bei einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h eine Straßentankstelle innerhalb von 15 min zu erreichen [29].

Als Alternative zum herkömmlichen Kraftstoff kann Flüssiggas als Treibstoff im Verbrennungsmotor genutzt werden. Ein herkömmliches Fahrzeug mit Ottomotor kann problemlos und ohne großen Aufwand durch einen zusätzlichen Gastank und einen Umschalter zwischen Benzin- und Flüssiggasbetrieb auf Autogas- bzw. Flüssiggas-Antrieb umgerüstet werden (LPG oder GPL: Gaz de pétrole liquéfié). Die Art und Weise der Betankung des Fahrzeuges sowie die Tankdauer orientieren sich dabei an konventionellen Diesel- und Benzinfahrzeugen.

Insgesamt waren im Jahr 2014 in ganz Deutschland ca. 6.800 Autogastankstellen in Betrieb. Hinzu kommen weitere 1.200 gewerblich genutzte Flüssiggastankstellen zur Betankung von firmeneigenen Flottenfahrzeugen mit Autogas. Die verfügbaren Abgabestellen entsprechen knapp der Hälfte der oben beschriebenen Tankstellenbetriebe für Diesel- und Benzin. Die durchschnittliche Zahl in Betrieb genommener Tankstellen ist in den letzten Jahren jedoch rückläufig und äußert sich in nur geringen jährlichen Zuwachsraten. Die regionale Verteilung der Tankstellen zeigt aber, dass in Deutschland mit einer Dichte von ca. 1 TS/10.000 EW von einer flächendeckenden Versorgung mit dem alternativen Kraftstoff Autogas gesprochen werden kann. Auch in anderen europäischen Ländern wie in den Niederlanden, Frankreich, Italien und Polen ist bereits ein flächendeckendes Tankstellennetz für Autogas verfügbar. [33, 34]

Eine weitere Möglichkeit, alternative Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren (Ottomotor) zu verwenden, liegt in der Nutzung von Erdgas (CNG). Um eine ausreichende Energiemenge im Fahrzeug mitführen zu können, wird Erdgas aufgrund der niedrigen Energiedichte (bei Normaldruck) auf etwa 200 bis 240 bar verdichtet und gasförmig

in einem Tank gespeichert [35]. Zahlreiche Fahrzeughersteller bieten bereits Fahrzeuge mit serienmäßigem Erdgasantrieb an. Genau wie bei der Nutzung von Flüssiggas ist es auch hier möglich, ein herkömmliches Fahrzeug mit Ottomotor für den alternativen Betrieb mit Erdgas umzurüsten.

Das Tankstellennetz für Erdgas ist im Vergleich zu Autogas in Deutschland weniger flächendeckend verfügbar. Die geografische Verteilung von Erdgastankstellen in Deutschland zeigt eine deutlich höhere Dichte vor allem in Nordwest-Deutschland. Derzeit sind etwa 900 Tankstellen in Betrieb, welche Erdgas in Form von CNG für Fahrzeuge anbieten [34]. Dabei wird unterschieden zwischen dem aus den GUS-Ländern und Norwegen stammenden H-Gas (High caloric-Gas) mit einem Methananteil von 87,0 bis 99,1 Volumenprozent (Vol.-%) und einem Energieinhalt von 13,10 bis 13,63 kWh/kg und L-Gas (Low caloric-Gas), das aus Deutschland selbst stammt. L-Gas besitzt einen geringeren Methananteil zwischen 79,8 und 87,0 Vol.-% und einen reduzierten Energieinhalt zwischen 10,66 und 11,26 kWh/kg. [35] Es besteht zudem die Möglichkeit, dem verwendeten Erdgas bis zu einem bestimmten Anteil aufbereitetes Biogas beizumischen. Auch Bioerdgas als alleiniger Energieträger ist möglich.

Ein konventioneller Verbrennungsmotor (Ottomotor) kann alternativ mit Wasserstoff als Kraftstoff betrieben werden. Analog zu Erdgasfahrzeugen ist es zudem möglich, das Fahrzeug in bivalenter Ausführung (Wasserstoff- und Benzinbetrieb) zu betreiben. Ein wesentlicher Nachteil ist dabei neben der Problematik der Wasserstoffherstellung der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur. Eine flächendeckende Versorgung herzustellen, erfordert hohe Investitionen. In Deutschland gibt es derzeit 29 Wasserstofftankstellen, von denen jedoch nur 17 öffentlich zugänglich sind. Ein weiterer Anstieg wird erwartet. Weitere Standorte für geplante Tankstellen sind bereits festgelegt. Die Initiative H₂-Mobility spricht sogar von 400 Standorten bis zum Jahr 2023. Aktuell sind weltweit insgesamt 184 Wasserstofftankstellen betriebsbereit. [36, 37] Auch brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge sind auf eine Wasserstoffinfrastruktur angewiesen.

2.3.2 Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge

Bestimmte Ausführungen von Elektrofahrzeugen wie beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge oder Plug-In-Hybridfahrzeuge sind auf eine Ladeinfrastruktur zum Laden ihrer Traktionsbatterien angewiesen. Ladeinfrastruktursysteme können dabei unterschiedliche Ausprägungen zeigen und bieten mehrere Möglichkeiten, die La-

derung der Fahrzeugbatterien zu bewerkstelligen. Welche Ladekonzepte grundsätzlich unterschieden werden, ist in **Abbildung 2.10** hierarchisch dargestellt.

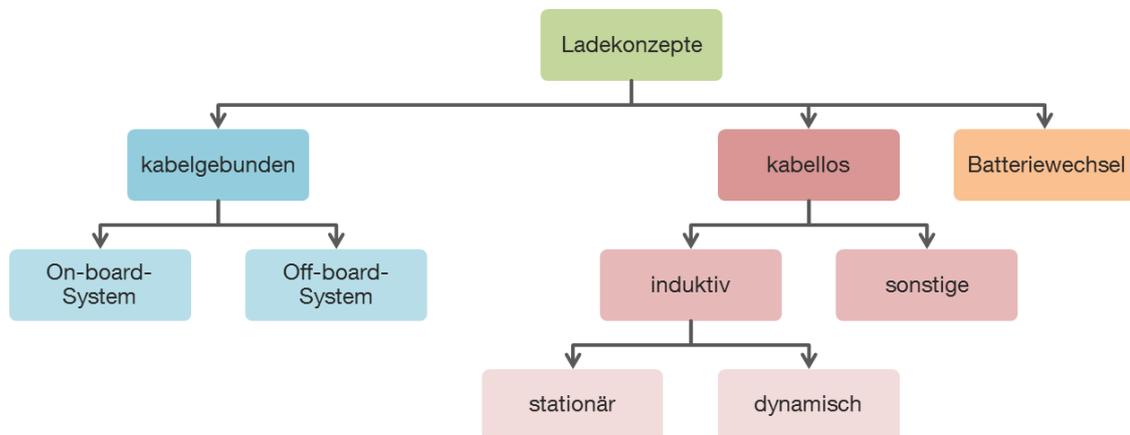


Abbildung 2.10: Überblick über unterschiedliche Ladekonzepte, eigene Darstellung nach [20, 38]

Die im Fahrzeug verbaute Batterie kann zunächst durch kabelgebundene (konduktive) Ladetechnologien mit elektrischer Energie versorgt werden. Dabei werden Systeme unterschieden, deren Ladegerät samt Ladetechnik sich im Fahrzeug befindet (On-board-System) und Systeme, die auf die Ladetechnik außerhalb des Fahrzeuges zugreifen (Off-board-System). Kabelgebundene Konzepte stellen derzeit die gängigste Lademethode dar. Beim kabellosen Laden muss keine gegenständliche Verbindung des Ladesteckers mit dem Fahrzeug hergestellt werden. Die elektrische Energie wird berührungslos übertragen. Die Möglichkeit des induktiven Ladens lässt beispielsweise stationäres (im Stillstand) oder dynamisches Laden (während der Fahrt) zu.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in einem weiteren Ladekonzept die Fahrzeugbatterie vollständig aus dem Fahrzeug zu entnehmen und durch ein vollgeladenes Exemplar zu ersetzen (Batteriewechsel). Dies geschieht an einer Batteriewechselstation, welche geladene Batterien zum Tausch vorhält.

Eine komfortable und sichere Lösung zum Laden von Elektrofahrzeugen jeglicher Art ist essentiell für den Durchbruch der Elektromobilität. Dabei hängt das verwendete Ladekonzept von vielerlei Faktoren ab (Standort, Siedlungsstruktur etc.). Dieses Kapitel stellt die verschiedenen Möglichkeiten aktueller Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge vor.

2.3.2.1 Konduktive Ladetechnologien

Das derzeit am weitesten verbreitete Ladekonzept basiert auf dem kabelgebundenen Laden. Es wird dabei zwischen Wechselstrom- (AC) und Gleichstromladen (DC) differenziert. Beim Wechselstromladen wird das Fahrzeug über ein Kabel mittels einer Ladestation, einer Wallbox (z. B. in der heimischen Garage) oder mittels eines haushaltsüblichen Wechselstromanschlusses mit dem Wechselspannungsnetz verbunden (einphasig- oder dreiphasig). Die Intelligenz wie Ladeeinheit und Leistungselektronik, um den verwendeten Wechselstrom in den für die Batterie notwendigen Gleichstrom umzuwandeln, sitzt dabei im Fahrzeug selbst. Auch kabelgebundenes Gleichstromladen ist möglich. Die Ladeeinheit samt Gleichrichter wird dabei aus dem Fahrzeug in die Ladestation verlagert, was ein direktes Beziehen des für die Batterieaufladung notwendigen Gleichstromes erlaubt. [20, 39]

Typische Kennzahlen des kabelgebundenen Ladens von Elektrofahrzeugen werden in **Tabelle 2.1** dargestellt.

Tabelle 2.1: Kennzahlen beim kabelgebundenen Laden von Elektrofahrzeugen einschließlich PHEV (Daten: [39])

Technologie	Ladeleistung [kW]	Ladestrom [A]	Batteriekapazität [kWh]	Netzanschluss
1-phasig AC	bis 3,7	bis 16	5-85 ¹	1-phasig AC
3-phasig AC	bis 43	bis 63	5-85 ¹	3-phasig AC
DC	bis 170	bis 200	5-85 ¹	3-phasig AC

1-phasiges Laden, wie es beim Anstecken des Fahrzeuges an einer Haushaltssteckdose praktiziert wird, erreicht bei 16 A Ladestrom Ladeleistungen bis zu 3,7 kW. Bei 3-phasigen Ladevorgängen können bereits 43 kW erreicht werden (63 A Ladestrom). Eine vergleichsweise hohe Leistung bis zu 170 kW (bei 200 A Ladestrom) ist bei DC- oder Gleichstromladen denkbar.

Beim AC-Laden werden gemäß DIN EN 61851-1 (VDE 0122-1) folgende sogenannte Ladebetriebsarten unterschieden [39]:

- Ladebetriebsart 1: AC-Laden erfolgt an Schutzkontakt-Steckdosen oder an ein- oder dreiphasigen CEE-Steckdosen; ohne Kommunikation zwischen Steckdose und Fahrzeug

¹ Richtwerte, abhängig vom Fahrzeugkonzept

- Ladebetriebsart 2: Gegenüber Ladebetriebsart 1 ist die Ladeleitung mit einer Steuer- und Schutzeinrichtung ausgestattet
- Ladebetriebsart 3 (empfohlen): AC-Laden findet über zweckgebundene Ladestation statt (Ladestation oder Wallbox); mit Datenaustausch zwischen Ladestation und Fahrzeug sowie Steuerung des Ladevorgangs

Ladebetriebsart 4 bezeichnet DC-Ladevorgänge und wird für Elektrofahrzeuge analog zu Ladebetriebsart 3 empfohlen.

Der Automobilhersteller Tesla bietet mit seinem sogenannten Supercharger eine DC-fähige Ladestation an, welche die Fahrzeugbatterie direkt mit 120 kW Gleichstrom speist. Die üblicherweise notwendige Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom im Fahrzeug entfällt in diesem Fall. Eine Reichweite von 270 km ist laut Herstellerangaben in 30 Minuten zu erreichen. [40]

Konduktive oder kabelgebundene Ladetechnologien sind bereits heute (auch im privaten Bereich) relativ einfach zu realisieren. Über gewöhnliche Haushaltssteckdosen können private Lademöglichkeiten geschaffen werden. Dies ist vor allen Dingen in weniger dicht besiedelten Regionen aufgrund der vermehrt zur Verfügung stehenden Privatgaragen mit Stromanschluss gegenüber städtischen Strukturen vorteilhaft. Somit kann im ersten Ansatz in ländlichen Regionen eine (private) Ladeinfrastruktur als größtenteils vorhanden bewertet werden.

2.3.2.2 Induktive Ladetechnologien

Die Übertragung der Energie zum Laden der Batterie kann auch kabellos erfolgen (induktives Laden). Dies wird durch ein elektromagnetisches Feld realisiert. Derzeit ist dieses Konzept, dessen Funktionsprinzip in **Abbildung 2.11** schematisch dargestellt ist, noch nicht kommerziell in Anwendung, wird jedoch in Demonstrationsfahrzeugen eingesetzt und untersucht.

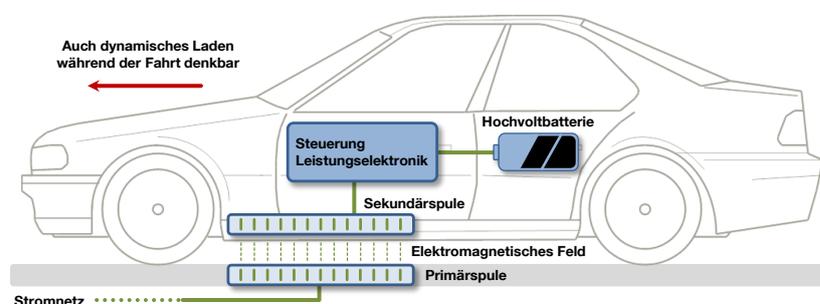


Abbildung 2.11: Funktionsprinzip des induktiven Ladens, eigene Darstellung nach [39, 41]

Über einen Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärspule wird durch ein anliegendes elektromagnetisches Feld elektrische Energie übertragen. Die Primärspule befindet sich im stationären Teil der Anlage im Boden (Verbindung zum Stromnetz). Die Sekundärspule hingegen ist im Unterboden des Fahrzeuges mit Verbindung zur Batterie verbaut (mobiler Teil). Der Luftspalt zwischen den Spulen kann bis zu 150 mm betragen. [39]

Für größtmögliche Effizienzen ist darauf zu achten, dass sich beide Spulen direkt gegenüberstehen und die elektromagnetischen Streufelder möglichst gering gehalten werden. In [42] wurde festgestellt, dass die maximal übertragbare Leistung eines Induktionsladesystems üblicherweise aus technischen Gründen 3,7 kW nicht überschreitet. Bei einem Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärspule zwischen 10 und 20 cm lässt sich jedoch ein vergleichsweise hoher Übertragungswirkungsgrad von etwa 95 % ableiten. Mit zunehmender Größe des Luftspaltes nimmt dieser jedoch stark ab. [20]

Für den dynamischen Einsatz induktiver Ladetechnologien müssten Straßen mit Spulen ausgerüstet werden. Nur so könnte eine Ladung der Batterie während der Fahrt erreicht werden. Technische und wirtschaftliche Hürden sind momentan jedoch noch verhältnismäßig hoch, so dass die Zukunft dynamischer Induktionsladesysteme derzeit noch nicht abzuschätzen ist. Vorteil des induktiven Ladens stellt in jedem Fall die bequemere Handhabung des Ladevorgangs im Vergleich zu konduktiven Ladevorgängen dar, die stets die Herstellung eines elektrischen Kontaktes zwischen Fahrzeug und Ladestation erfordern.

2.3.2.3 Batteriewechsel

Neben kabelgebundenen und kabellosen Ladetechnologien ist auch ein Wechsel der Traktionsbatterie möglich. Anstatt die im Fahrzeug befindliche Batterie zu laden, wird das gesamte Batteriesystem entnommen und anschließend ein geladenes System eingesetzt. Zeitlich betrachtet kommt das Batteriewechselkonzept dem herkömmlichen Tanken eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuges vergleichsweise nahe.

Maßgeblich geprägt wurde dieses innovative Batteriewechselkonzept von dem US-amerikanischen Unternehmen Better Place, das im Mai 2013 jedoch aufgrund fehlender Investoren Insolvenzantrag gestellt hat. Im Jahr 2008 entstand eine Kooperation zwischen Better Place und Renault, um mit Batteriewechselstationen und entsprechenden Fahrzeugen eine alternative Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu schaffen. Feldversuche sind anschließend in mehreren Ländern wie Israel, Däne-

mark, den Niederlanden, China, Japan und den USA gestartet worden. Die Erschließung weiterer Märkte war geplant. Bis zum Jahr 2016 sollten 100.000 batteriewechselfähige Elektroautos verkauft werden [20, 43].

Vorteil des Batteriewechsels ist die verhältnismäßig kurze Standzeit von näherungsweise fünf Minuten [44]. Dadurch entfallen lange Wartezeiten und der Aktionsradius des Nutzers vergrößert sich. Außerdem bietet dieses Konzept die Möglichkeit, die Batterien zu planbaren Zeiten zu laden. Bei der Konzeptionierung dieses Ladekonzeptes sind jedoch auch problematische Aspekte zu betrachten, denen bei herkömmlichen konduktiven Ladetechnologien weniger Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Zum einen ist vorauszusetzen, dass die Batterie – verbaut im Unterboden des Fahrzeuges – für den Batteriewechsel frei zugänglich ist. Zum anderen kommt hinzu, dass das System mit unterschiedlichen Batterietypen zurechtkommen muss, was die technischen Herausforderungen erhöht. Je nach Auslastung einer Batteriewechselstation muss zudem eine ausreichende Menge an geladenen Fahrzeugbatterien vorgehalten werden, die z. B. im Eigentum des Stationsbetreibers stehen. Der Batterietausch führt auch dazu, dass das Fahrzeug des Nutzers nicht mehr an eine dedizierte Batterie gebunden ist. Überlegungen hin zu einheitlichen standardisierten Batterien könnten den Vorgang des Batteriewechsels jedoch optimieren. Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Aufbau eines Netzes aus Batteriewechselstationen hohe Investitionen nach sich zieht und Automobilhersteller sich durch den Einsatz standardisierter Energiespeicher in gewisser Weise in ihrer Fahrzeugentwicklung eingeschränkt sehen. [20]

Aktuell sind Entwicklungen im Bereich Batteriewechselstationen auch bei Tesla Motors zu beobachten [45].

2.3.3 Ladestandorte für Elektrofahrzeuge

Im Gegensatz zu diesel- oder benzinbetriebenen Fahrzeugen benötigen Elektrofahrzeuge zur Vollladung ihrer Batterien eine wesentlich längere Standzeit bzw. Parkzeit. Die diskutierten Ladetechnologien müssen also auch vor dem Hintergrund der Ladestandorte diskutiert werden. Besonderheiten im privaten, halböffentlichen oder öffentlichen Raum beeinflussen die Ausgestaltung der dort nutzbaren Ladeinfrastruktur wesentlich. Die folgenden Ausführungen beschreiben kurz diese Räume im Hinblick auf unterschiedliche Ausgestaltungen von Ladeeinrichtungen.

2.3.3.1 Privater Raum

Von privaten Ladeeinrichtungen wird gesprochen, wenn die Möglichkeit besteht, das Fahrzeug in der eigenen Garage zuhause/am eigenen Stellplatz oder auf dem Firmengelände des Arbeitsplatzes (Arbeitnehmerparkplätze) laden zu können [46]. Es genügt im einfachsten Fall, lediglich eine Ausstattung des Parkplatzes mit einem Stromanschluss vorzunehmen. Ein großer Vorteil dieses Konzeptes ist die vergleichsweise einfache Realisierung des Ladevorganges sowie die unproblematische Abrechnung über den bestehenden Stromanbieter.

Dieses Konzept der privaten Ladeinfrastruktur ist insbesondere auf dem Land, in weniger dicht besiedelten Regionen oder in ländlich geprägten Vororten von Städten vielversprechend und ohne großen Aufwand aufzubauen. Ländliche Strukturen sind meist geprägt von einem hohen Anteil privater Abstellmöglichkeiten auf dem eigenen Grundstück, während städtische und dicht besiedelte Strukturen Abstellmöglichkeiten für Fahrzeuge häufig nur auf öffentlichen Straßen erlauben, wo die Zurverfügungstellung eines Stromanschlusses kritisch zu betrachten ist.

Abbildung 2.12 verdeutlicht für unterschiedliche Gemeindegrößen die Abstellmöglichkeiten für Fahrzeuge.

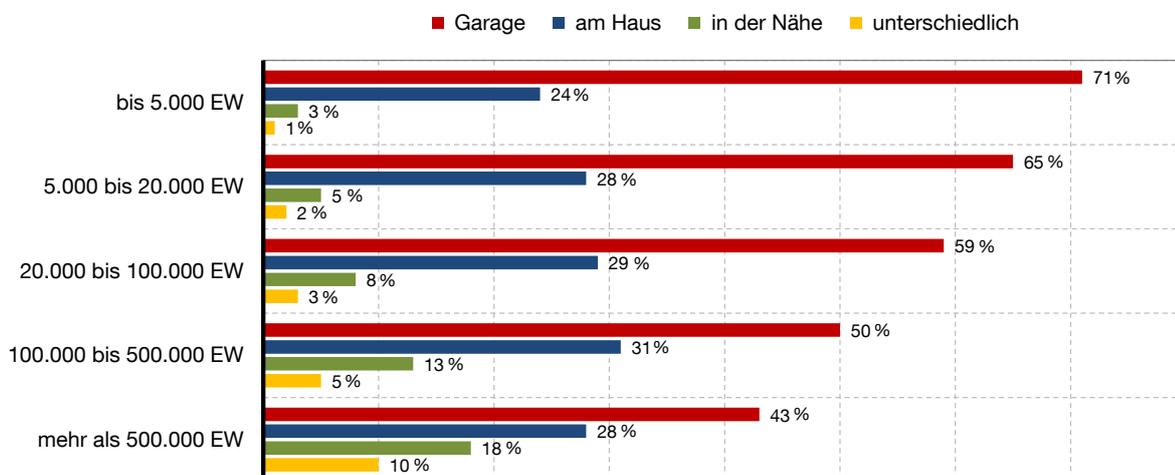


Abbildung 2.12: Abstellmöglichkeiten für Fahrzeuge differenziert nach Gemeindegröße (Daten: [47, 48])

Nach [48] ist in städtischen Regionen die Mehrheit der Fahrzeugnutzer nicht in der Lage, eine private Garage oder einen Tiefgaragenstellplatz zum Abstellen des Fahrzeuges zu nutzen: In Deutschland besitzen nur ca. 50 % der Fahrzeugeigentümer in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern und nur 43 % in Städten mit mehr als einer halben Million Einwohner eine Privatgarage. Etwa 30 % können in beiden Struk-

turen Abstellmöglichkeiten am Haus nutzen. In Megastädten wie Singapur fällt der Anteil an privaten Garagen nochmals deutlich geringer aus. In ländlichen Regionen hingegen kann aufgrund geringerer Bevölkerungsdichten und des höheren Anteils von Einfamilienhäusern (EFH) die Mehrheit der Fahrzeugbesitzer eine private Garage zum Abstellen ihres Fahrzeuges beanspruchen. In kleineren Gemeinden mit weniger als 5.000 Einwohnern liegt der Anteil der Parkmöglichkeiten in der eigenen Garage oder unmittelbar am Haus bei insgesamt 95 %. Dieser Wert sinkt mit steigender Gemeindegröße auf 93 % (5.000 bis 20.000 EW) bzw. 88 % für Ortschaften zwischen 20.000 und 100.000 Einwohnern. Auch die repräsentative Studie „Future Mobility 2012“ geht von einem Anteil der Garagen- und Carport-Besitzer in Wohnorten bis 20.000 Einwohnern von 82 % aus. In Städten mit mehr als 1 Mio. Einwohner wurden 44 % ermittelt. [49] Ähnliche Ergebnisse konnten mithilfe einer empirischen Untersuchung auch für die ländlich geprägte Untersuchungsregion Schöllnach zu Tage gefördert werden (Kapitel 5.3).

Grundsätzlich verdeutlichen diese Zahlen, dass gerade für den ländlichen Bereich oder für städtische Vororte der Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur sinnvoll und zielführend ist. Hinsichtlich der Infrastrukturkosten sowie der Integration der Elektromobilität zeigen ländliche Regionen gegenüber Städten klare Standortvorteile.

2.3.3.2 Halböffentlicher Raum

Ladetechnologien im halböffentlichen Raum umfassen Ladeeinrichtungen in öffentlich zugänglichen Parkhäusern, wo Kundenparkplätze (z. B. im Einkaufszentrum) angeboten werden, auf Firmenparkplätzen oder in den (Fern-)Verkehr integrierte Ladelösungen auf Rastplätzen, Autohöfen und Tankstellen [46]. Diese Flächen können problemlos mit Stromanschlüssen und Ladestationen ausgerüstet werden und somit von Kunden an Supermärkten, Pendlern an Bahnhöfen oder Mitarbeitern auf dem Firmengelände genutzt werden. Eine beschränkte Zahl an möglichen Nutzern der zur Verfügung gestellten Ladestationen erleichtert auch hier die Abrechnung der Ladekosten.

Insbesondere für große und dicht besiedelte Städte wie Singapur kann der Aufbau einer halböffentlichen Ladeinfrastruktur in Kombination mit privaten Lademöglichkeiten vorteilhaft sein. Singapur weist zum einen eine sehr hohe Zahl an Einkaufszentren mit angeschlossenen Tiefgaragen und Parkhäusern auf, zum anderen sind auch die Wohnanlagen durch große, angrenzende Parkhäuser charakterisiert. Straßenparken ist in Singapur keine Option (Kapitel 5.1).

2.3.3.3 Öffentlicher Raum

Unter einer öffentlichen Ladeinfrastruktur werden Ladeeinrichtungen am Straßenrand am Wohnort oder auf größeren öffentlichen Parkplätzen an zentralen Stellen verstanden [46]. In dicht bebauten und städtischen Gebieten ist es den meisten Fahrzeugnutzern nicht möglich, private Lademöglichkeiten zu nutzen. Insgesamt zeigt der öffentliche Raum ein verhältnismäßig großes Potential für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur. Es existieren jedoch Aspekte, die den Aufbau deutlich erschweren können und potentielle Standorte für Ladestationen schmälern. So müssten sämtliche Parkplätze hinsichtlich der Stromversorgung neu erschlossen werden, da – im Gegensatz zur privaten und halböffentlichen Situation – meist noch kein Stromanschluss vorhanden ist (Verlegung von Kabeln, Einrichtung eines Netzanschlusses). Neben hohen Investitionskosten ist zudem sicherzustellen, dass ein mit einer Ladestation ausgerüsteter Parkstand auch nur von Elektrofahrzeugen angefahren wird und somit exklusiv zur Verfügung steht. Eine exklusive Nutzung dürfte jedoch z. B. in Ballungsräumen mit generellem Mangel an Parkmöglichkeiten schwierig durchsetzbar sein. Außerdem ist die Thematik der Abrechnung von Stromkosten für den Ladevorgang zu lösen. Derzeit existieren mehrere unterschiedliche Bezahlssysteme verschiedener Anbieter und somit Nutzer-Barrieren, was die Verwendung von Ladesystemen untereinander erschwert (Zugangskarten etc.).

2.3.4 Ausbauzustand der Ladeinfrastruktur in Deutschland und der Welt

Abbildung 2.12 zeigt, dass ein Großteil der Fahrzeugnutzer in Deutschland sein Fahrzeug theoretisch entweder in der privaten Garage abstellen oder unmittelbar am Gebäude parken kann. In ländlichen Regionen liegt dieser Anteil weit über 90 %. Aber auch in dicht besiedelten Gegenden und Kommunen mit mehr als 500.000 Einwohnern besteht immer noch für 43 % der Fahrzeugnutzer die Möglichkeit, auf eine private Abstellmöglichkeit in der Garage zurückzugreifen. Bei Betrachtung aller Kommunen liegt der Anteil der Parkmöglichkeiten in Privatgaragen durchschnittlich bei rund 57 %. Vor diesem Hintergrund bleibt festzuhalten, dass unter Annahme einer vergleichsweise einfachen Realisierung eines Stromanschlusses in Garagen und Stellplätzen unmittelbar am Haus bereits ein beträchtlicher Teil an Elektrofahrzeugen über eine private Lademöglichkeit an das Stromnetz zur Aufladung der Fahrzeugbatterie angebunden werden könnte. Auch die Nationale Plattform Elektromobilität der Bundesregierung geht in ihrem Fortschrittsbericht 2014 [46] davon aus, dass bereits heute die wesentlichen Voraussetzungen für den Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur in Deutschland vorhanden sind. Demnach fallen etwa 85 % der

benötigten Ladeinfrastruktur in den privaten Bereich, während die restlichen 15 % von halböffentlichen und öffentlichen Ladepunkten abgedeckt werden.

In Deutschland existieren derzeit gut 5.550 Ladepunkte, die öffentlich zugänglich sind. Diese verteilen sich auf 2.521 Ladestationen, die von 286 Unternehmen betrieben werden. Innerhalb eines Jahres (von Dezember 2013 bis Dezember 2014) konnte der Bestand an Ladepunkten um 25 % gesteigert werden. [50]

Die Verteilung der Ladepunkte auf die 16 Bundesländer in Deutschland (gesamt, je Mio. EW und je 1.000 km²) ist in **Abbildung 2.13** grafisch dargestellt.

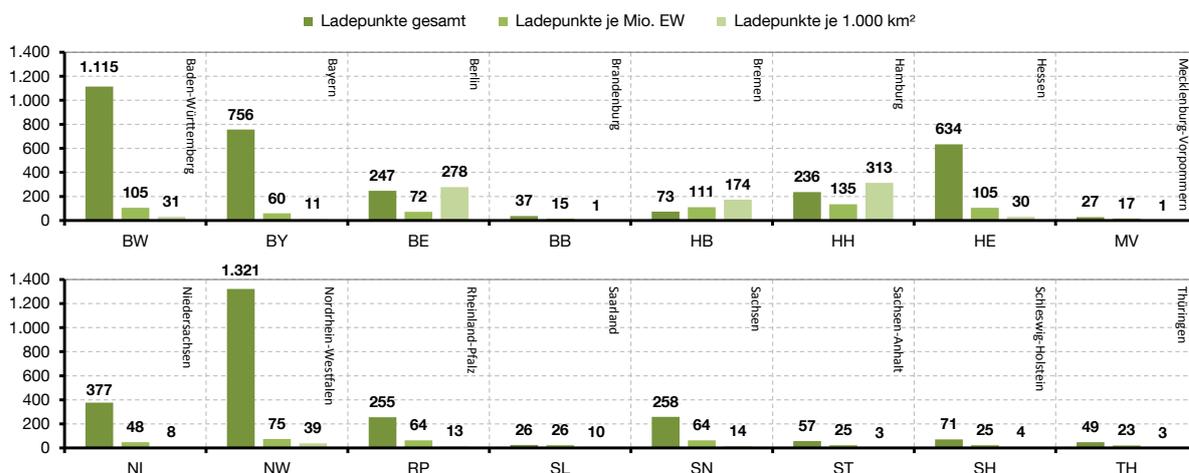


Abbildung 2.13: Öffentlich zugängliche Ladepunkte für Elektroautos differenziert nach Bundesländern (Daten: [50])

Die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern stehen mit jeweils 1.321, 1.115 und 756 Ladepunkten an der Spitze in Deutschland. Die wenigsten öffentlichen Ladepunkte verzeichnen Mecklenburg-Vorpommern (27) und das Saarland (26). Auf Stadtbasis kann Stuttgart 384 Ladepunkte anbieten, gefolgt von Berlin mit 247 und Hamburg mit 236 Ladepunkten. Insgesamt ist bereits in 839 deutschen Städten mindestens eine öffentliche Ladestation für Elektrofahrzeugnutzer zugänglich. Zum Einsatz kommen vorwiegend AC-Ladestationen mit Typ 2-Stecker bis 22 kW Ladeleistung. Außerdem existieren rund 100 DC-Schnellladestationen. [50]

Des Weiteren bietet aktuell Tesla Motors 38 seiner Supercharger zur DC-Schnellladung innerhalb des Bundesgebietes an [40].

Auffallend ist, dass hauptsächlich in den Gebieten, die als Modellregionen Elektromobilität fungieren und diesbezüglich verstärkt gefördert wurden, in den letzten Jahren die größten Zuwächse an Ladestationen und Ladepunkten festzustellen sind.

Wird von derzeit etwa 19.000 zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland ausgegangen, kommen auf jeden Ladepunkt etwa 3 bis 4 zu ladende Fahrzeuge.

Für Deutschland kann zusammenfassend angeführt werden, dass die Bundesregierung den flächendeckenden Ausbau einer öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur, insbesondere auch hinsichtlich der CCS-Strategie (Combined Charging System) als verbindliches europäisches Ladesystem, weiter vorantreiben will. Unter Zugrundelegung einer Zahl von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 soll der Finanzierungsbedarf bei etwa 550 Mio. Euro bis 2020 liegen. Die Entwicklung tragfähiger Förder- und Finanzierungskonzepte für den Aufbau ist daher unerlässlich. [46]

Die aktuelle weltweite Situation, was den Ausbauzustand der öffentlichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge betrifft, zeigt **Abbildung 2.14**.

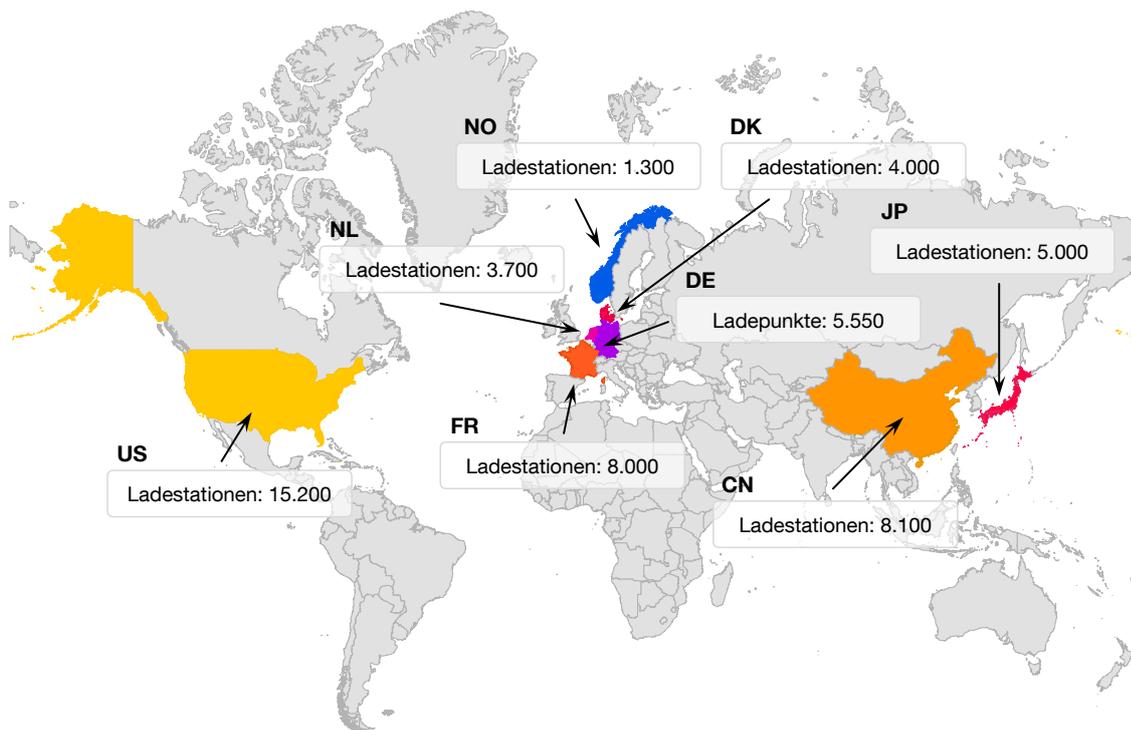


Abbildung 2.14: Zahl der verfügbaren öffentlichen Ladestationen/Ladepunkte im internationalen Vergleich (Daten: [46, 50])

In den USA können Elektrofahrzeuge derzeit an knapp 15.200 Ladestationen aufgeladen werden. Hier kommt unter anderem auch das CCS-System mit dem Typ 1-Stecker zum Einsatz, das zusammen mit europäischen Partnern entwickelt wurde. 8.100 Ladestationen stehen in China zur Verfügung. Um die Zusammenarbeit und

den Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet der Ladeinfrastrukturen mit internationalen Partnern zu fördern, besteht derzeit ein von der deutschen und chinesischen Regierung gefördertes „Sino-German EV Charging Project“ zur Entwicklung innovativer Lösungen für öffentliche und private Ladeeinrichtungen. [46]

In Frankreich liegt die Zahl der öffentlich zugänglichen Ladestationen bei 8.000, gefolgt von Japan mit 5.000. Auch mit Japan ist Deutschland hinsichtlich der Harmonisierung der DC-Schnelllade-Bestandteile des europäischen CCS und des japanischen CHAdeMO (Charge de Move) in Diskussionen, mit dem Ziel der Erarbeitung einer gemeinsamen Roadmap für das Laden mit Gleichstrom. Obwohl die Niederlande über keine eigenen Fahrzeughersteller verfügen, entwickelt sich dort der Aufbau der Ladeinfrastruktur jedoch sehr dynamisch (3.700 Ladestationen). Ähnliches kann auch in Norwegen und Dänemark festgestellt werden. In beiden Ländern wird der Aufbau der Ladeinfrastruktur auch durch monetäre Anreize und Subventionen für den Kauf von Elektrofahrzeugen vorangetrieben. [46]

2.4 Energiebereitstellung für Elektrofahrzeuge

Die Umweltverträglichkeit und Ladekosten von Elektrofahrzeugen hängen im Wesentlichen von Energieerzeugung und Energiebereitstellung ab. Rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge stoßen lokal keine Emissionen aus, da sie für den Antrieb keine fossilen Energieträger nutzen, welche bei der Verbrennung Emissionen erzeugen, sondern auf die Nutzung eines Elektromotors und elektrische Energie zurückgreifen. Emissionen entstehen jedoch im vorgelagerten Energiesektor bei der Erzeugung des zum Laden der Fahrzeugbatterie notwendigen Stromes. Je nach Kraftwerks- und Primärenergieträgereinsatz fallen die indirekten Emissionen unterschiedlich hoch aus und beeinflussen somit die ökologische und wirtschaftliche Bewertung von alternativen Antriebstechnologien. Im Hinblick auf die energiewirtschaftliche Integration von Elektrofahrzeugen bleibt die Frage zu klären, welche Emissionen und welche Kosten Elektrofahrzeugen zuzuordnen sind.

Die Energieerzeugung in Deutschland weist eine hohe Diversität der verwendeten Primärenergieträger auf und ist maßgeblich geprägt von Stein- und Braunkohle, Mineralöle, Gase und Kernenergie [51]. Dies führt zu einer CO₂-intensiven Stromproduktion und hohen Stromgestehungskosten. Im Vergleich zu Deutschland kann beispielsweise in der Schweiz oder in Frankreich Strom sehr emissionsarm über Kernkraft- und Wasserkraftwerke bereitgestellt werden, was zu sinkenden Stromgestehungskosten und zu geringeren zugeteilten CO₂-Emissionen für Elektrofahrzeuge führt [52–54].

Entscheidend für die CO₂-Emissionen, die Elektrofahrzeugen zugeordnet werden können, ist zudem auch der Zeitpunkt, zu dem der Ladestrom benötigt wird. Die im Kraftwerkspark verfügbaren thermischen Kraftwerke werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Tagesverlauf gemäß ihrer Grenzkosten eingesetzt (von geringen bis hohen Kosten). Damit ergeben sich zeit- und netzlastabhängige Kraftwerkszusammensetzungen, die in der sogenannten Merit Order oder Einsatzreihenfolge beschrieben werden. Für Deutschland werden z. B. zunächst Kernkraftwerke mit niedrigen Grenzkosten eingesetzt (Grundlastkraftwerke), gefolgt von Braunkohle-, Steinkohle- (Mittellastkraftwerke) und Gaskraftwerken (Spitzenlastkraftwerke). Regenerativ erzeugter Strom wird mit theoretischen Stromgestehungskosten von 0 EUR/kWh bevorzugt in das Netz eingespeist und nicht in der Einsatzreihenfolge berücksichtigt. Je nach Netzlast und Tageszeit kommt es also zu einer abweichenden Zusammensetzung der produzierenden Kraftwerke und somit unterschiedlichen Emissionen pro erzeugter kWh Strom, welche letztendlich den Elektrofahrzeugen abhängig vom Ladezeitpunkt zugeschrieben werden können. [54]

Kraftwerke müssen die über einen Tag angeforderte Last decken. Wird von der benötigten Last die fluktuierende Einspeisung abgezogen, ist die sogenannte residuale Last gemeint, die von den regelbaren (thermischen) Kraftwerken gedeckt werden muss. Kommen neue Verbraucher wie Elektrofahrzeuge in das Stromnetz, wird die angeforderte Last aufgrund des benötigten Ladestroms erhöht. Auch dieser zusätzliche Teil ist von den vorhandenen Kraftwerken zu übernehmen.

Bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen lassen sich hinsichtlich der Ladestrategie unterschiedliche Konzepte realisieren. Eine naheliegende Möglichkeit stellt das sogenannte ungesteuerte Laden nach Ende der Fahrzeugnutzung dar. Die Fahrzeugbatterie wird dabei nach Anschluss an das Stromnetz unmittelbar mit elektrischer Energie versorgt, ohne Eingriff einer intelligenten Ladesteuerung. Typischerweise finden in Deutschland die meisten Fahrten frühmorgens sowie spätnachmittags statt, wenn die Bevölkerung zur Arbeit aufbricht oder den Weg nach Hause antritt. Zu diesen Zeitpunkten sind aber zudem auch Lastspitzen im elektrischen Tageslastgang festzustellen. Ungesteuertes Laden würde demnach diese Lastspitzen um die zusätzliche Anforderung der Elektrofahrzeuge erhöhen. [54]

Abbildung 2.15 (links) zeigt den qualitativen Verlauf der ursprünglichen Lastprognose sowie der Lastprognose mit Elektrofahrzeugen bei ungesteuertem Laden. Die Differenz beider Kurven bildet den von den Kraftwerken zu deckenden zusätzlichen Ladestrombedarf, verursacht durch Elektrofahrzeuge.

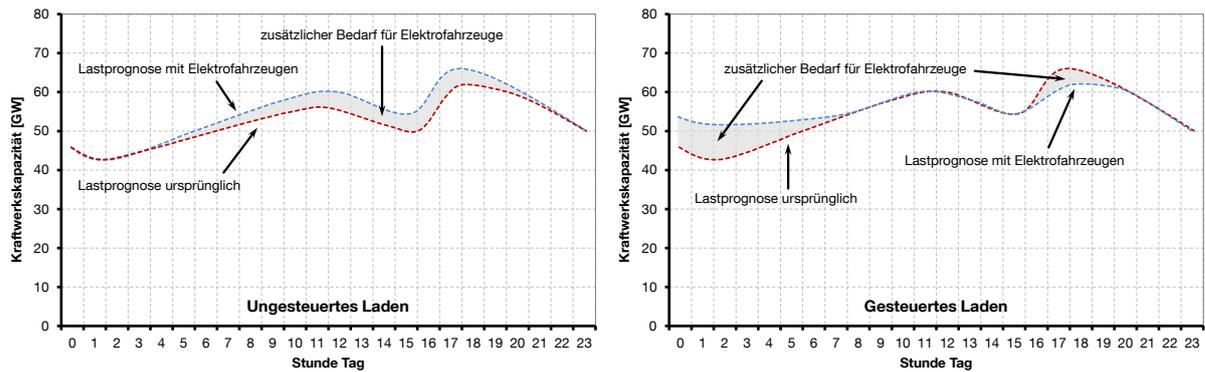


Abbildung 2.15: Schematischer Verlauf beispielhafter Lastkurven bei ungesteuertem Laden (links) und gesteuertem Laden (rechts), eigene Darstellung nach [54]

Deutlich wird zudem, dass hauptsächlich Spitzenlastkraftwerke zur Deckung des zusätzlichen Bedarfs herangezogen werden, die zum Abfangen von Lastspitzen im Tageslastgang eingesetzt werden. Grundlast- und Mittellastkraftwerke sind bereits vollständig ausgelastet und tragen nicht zur Deckung der Lastspitzen zur Mittagszeit oder am Abend bei. Stößen diese Kraftwerke an ihr Maximum und steigt die Größe der zu ladenden Elektrofahrzeugflotte an, müssten ferner weitere Kraftwerkskapazitäten zur Verfügung gestellt werden. [54]

Rechterhand in Abbildung 2.15 ist das Konzept des gesteuerten Ladens schematisch dargestellt. Dieses Konzept sieht vor, Fahrzeuge nicht unmittelbar nach der Kopplung mit dem Stromnetz zu laden, sondern den Ladezeitpunkt mittels einer intelligenten Ladesteuerung hin zu kostenoptimalen Zeitpunkten zu verschieben. Die Grafik verdeutlicht, dass eine Verschiebung der Ladezeitpunkte z. B. in die Nachtstunden hinein ein Auffüllen des Lasttales ermöglichen würde. Während dieses Zeitraumes sind vorwiegend Mittellastkraftwerke aktiv, die aber nicht vollständig ausgelastet sind und den zusätzlichen Bedarf abzufangen in der Lage sind. Die Produktion ist also über die ursprüngliche Lastprognose hinaus anzupassen. Auf der anderen Seite bietet sich zudem die Möglichkeit, vor allen Dingen während der frühen Abendstunden, wenn eine große Zahl von Fahrzeugen im Netz zur Verfügung steht, einen negativen Bedarf zu erzeugen und die in den Fahrzeugbatterien enthaltene Energie zur Netzstützung einzuspeisen. Dadurch kommt es zu einer Abflachung von Lastspitzen und die erforderliche Kapazität von Spitzenlastkraftwerken kann reduziert werden. Insgesamt trägt dieses Konzept zur Vergleichmäßigung des Tageslastganges bei (weitere Informationen siehe [54]).

Die beiden beschriebenen Konzepte zeigen, dass der Ladezeitpunkt die Zusammensetzung des Ladestroms bestimmt und somit auch die spezifischen Emissionen

und Kosten, die beim Laden der Fahrzeugbatterie entstehen. Wird nur regenerativ erzeugter Strom verwendet, sind keine indirekten Emissionen vorhanden. Stammt der Ladestrom beispielsweise aus Mittellastkraftwerken, fallen die Emissionen höher aus als bei Verwendung von Strom aus Spitzenlastkraftwerken.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Energiebereitstellung und die damit verbundenen Emissionen und Kosten bei der Ladung von Elektrofahrzeugen einen wesentlichen Aspekt bei der wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung darstellen. Unterschiedliche Zuordnungsmethoden von Emissionen sowie die Nutzung verschiedener Ladekonzepte führen letztendlich zu differenzierten Ladekosten und Emissionen.

2.5 Elektromobilitätsmarkt

Die derzeitigen Entwicklungen im Fahrzeugmarkt hinsichtlich alternativer Antriebskonzepte schließen die Ausführungen zu den Grundlagen und den Stand der Technik in der Elektromobilität in dieser Arbeit ab. Zunächst wird dabei auf die Situation in Deutschland eingegangen. Daran schließt sich eine Beschreibung der aktuellen Entwicklungen weltweit an.

2.5.1 Fahrzeugmarkt in Deutschland

Nach [55] ist es das Ziel der Bundesregierung, „*dass bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.*“ Bis zum Jahr 2030 sollen es sogar 6 Mio. sein, knapp 15 % des derzeitigen Pkw-Bestandes in Deutschland. In diesem Wandlungsprozess von der herkömmlichen zur alternativ gestalteten Mobilität soll Deutschland die Rolle des internationalen Leitmarktes und Leitanbieters für Elektromobilität (Industrie) übernehmen. Dabei gilt es, sich den bereits oben ausgeführten wesentlichen Herausforderungen bei der Batterieforschung und der Batterieherstellung sowie beim Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur zu stellen und Lösungskonzepte zu finden. [46, 55]

Die momentane Situation hinsichtlich der Zahl zugelassener Elektrofahrzeuge in Deutschland ist noch als vergleichsweise verhalten einzustufen, was die Erreichung der ambitionierten Ziele der Bundesregierung bis 2020 gefährden könnte.

Abbildung 2.16 zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestandes nach alternativen Kraftstoffarten (Elektro-, Hybrid-, Flüssiggas- und Erdgasfahrzeuge) in Deutschland in der Zeitreihe von 2006 bis 2015. Der Bestand an benzin- und dieselpetriebenen Fahrzeugen bleibt in dieser Zusammenstellung unberücksichtigt. Im abgebildeten Zeitraum kam es jedoch bei herkömmlichen Benzinfahrzeugen zu einem Rückgang von

knapp 36 Mio. Fahrzeugen im Jahr 2006 auf etwa 29,8 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2015 (-17 %). In derselben Periode erfuhren Fahrzeuge mit Dieselmotor einen Anstieg um gut 37 % von 10 Mio. auf 13,8 Mio. [56]

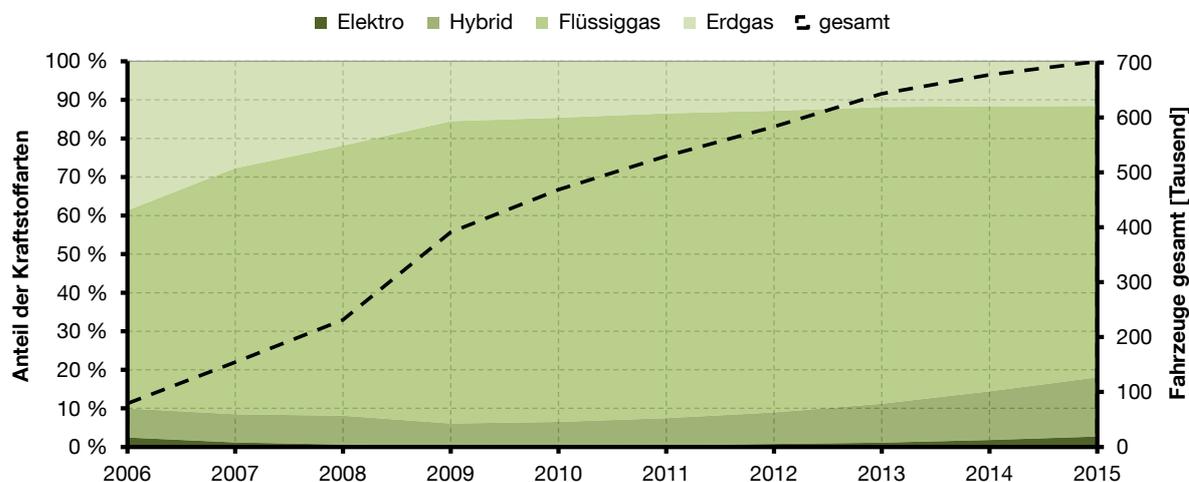


Abbildung 2.16: Pkw-Bestand in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten alternativen Kraftstoffarten (Daten: [56])

Flüssiggasbetriebe Fahrzeuge nahmen seit 2006 stetig zu und stagnieren seit dem Jahr 2009 bei etwa 70 % Anteil an den alternativen Antrieben. Hybridfahrzeuge konnten in den letzten Jahren einen Anstieg verbuchen, genauso wie reine batteriebetriebene Fahrzeuge. Relativ gesehen wurden Erdgasfahrzeuge nach und nach in den Hintergrund gedrängt. In absoluten Zahlen gesehen sind in Deutschland derzeit (Stand 2015) etwa 700.000 Fahrzeuge registriert, die mit alternativen Kraftstoffarten betrieben werden. Nur ein vergleichsweise kleiner Teil ist dabei Elektro- (19.000) bzw. Hybridfahrzeugen (108.000) zuzuschreiben.

Der Bestand an Elektro- und Hybridfahrzeugen im Jahr 2015 von gut 130.000 Fahrzeugen entspricht rund 13 % der von der Bundesregierung angestrebten Zahl an Elektrofahrzeugen für das Jahr 2020. Die Absatzzahlen bzw. der Bestandszuwachs bei den alternativen Antriebstechnologien im gesamten Jahr 2014 in Deutschland werden gesondert in **Abbildung 2.17** dargestellt.

Allein im Jahr 2014 konnte in Deutschland ein Absatz von mehr als 13.000 Fahrzeugen verzeichnet werden. Dies entspricht einer Steigerung von gut 15 % gegenüber dem Vorjahr. Grundsätzlich ist über das gesamte Jahr ein Anstieg in den Absatzzahlen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zu erkennen. Eine gesteigerte Dynamik im Elektromobilitätsmarkt in Deutschland zeichnet sich in jeden Fall ab.

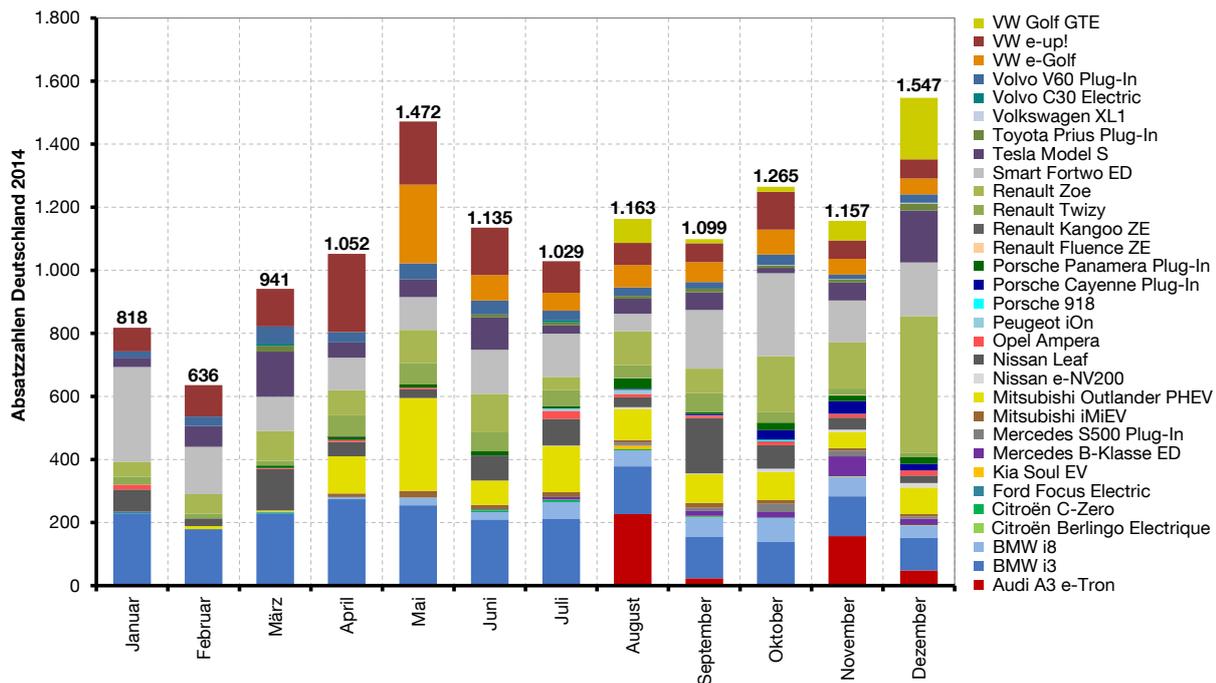


Abbildung 2.17: Absatzzahlen für Elektro- und Hybridfahrzeuge in Deutschland im Jahr 2014 (Daten: [57–59])

2.5.2 Fahrzeugmarkt international

Im internationalen Kontext spielt die Elektromobilität eine zunehmende Rolle. Dabei hat sich Deutschland bezüglich der Leitanbieterschaft eine komfortable Position erarbeitet und steht mit den USA, Japan, Frankreich und China in Konkurrenz [46]. Im Hinblick auf den Bestand an Elektrofahrzeugen rangiert Deutschland derzeit aber nicht auf den vorderen Rängen. Stärkere Kaufanreize und höhere staatliche Subventionen in europäischen, asiatischen und amerikanischen Märkten führen zu deutlich höheren Marktanteilen von Elektrofahrzeugen verglichen mit der Situation in der Bundesrepublik Deutschland.

Der Marktanteil elektrifizierter Pkw im Vergleich zum Pkw-Bestand in ausgewählten Ländern weltweit ist in **Abbildung 2.18** dargestellt. Die Zahlen spiegeln den Markt aus dem Jahr 2013 wider. Elektrifizierte Pkw stehen für die Gesamtheit der batterieelektrischen Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge.

Norwegen weist einen vergleichsweise hohen Marktanteil von 6,1 % auf und ist damit Spitzenreiter. Dieser Anteil ist der massiven Förderung der Elektromobilität in Norwegen geschuldet. Zusätzlich erfahren dort Käufer von Elektrostraßenfahrzeugen (ESF) Entlastungen bei der Kraftfahrzeugsteuer sowie beim Aufladen der Fahrzeugbatterien. Darüber hinaus dürfen mit Elektrofahrzeugen Busspuren benutzt werden. Auch in den Niederlanden werden ähnliche Konzepte zur Förderung innovativer An-

triebskonzepte verfolgt. Island, Japan und Frankreich liegen mit etwa 1 % Marktanteil eng beieinander. Es folgen Estland, Schweden, die USA, die Schweiz sowie Dänemark auf Platz 10 mit 0,3 % Marktanteil. Für Deutschland kann ein Wert von 0,23 % angegeben werden.

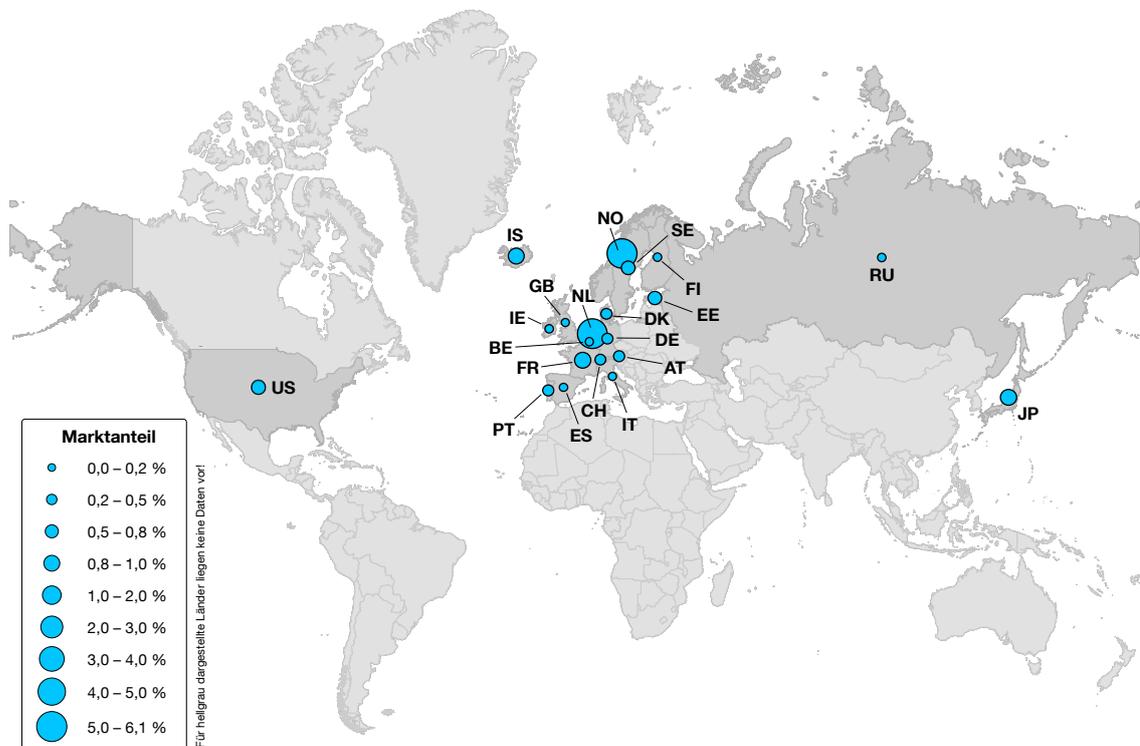


Abbildung 2.18: Marktanteil elektrifizierter Pkw weltweit im Vergleich zum Pkw-Bestand (Daten: [58])

Aus der Perspektive der rein batterieelektrischen Pkw ist Norwegen nach wie vor an erster Stelle zu finden und zeigt mit 5,75 % einen ähnlich hohen Marktanteil wie bei Betrachtung der Gesamtheit der elektrifizierten Pkw. Weit abgeschlagen sind die nachfolgenden Länder wie die Niederlande (0,83 %) oder Frankreich (0,79 %). Auf den weiteren Positionen sind Estland, Irland, Japan, die Schweiz, Schweden, Dänemark und die USA zu finden. Für die rein batterieelektrischen Fahrzeuge weist Deutschland 2013 einen Marktanteil von 0,21 % auf. Die Top 10 der Länder mit dem größten Marktanteil an Hybridfahrzeugen führten 2013 die Niederlande mit 4,72 % an, gefolgt von Schweden (0,41 %) und Japan (0,4 %). Norwegen, die USA und Island liegen im Bereich von 0,25 bis 0,34 % Marktanteil. Finnland (0,13 %), das Vereinigte Königreich, Frankreich und die Schweiz mit jeweils 0,05 % liegen auf den Plätzen 7 bis 10. Deutschland erreichte 2013 einen Anteil von 0,02 %. [58]

Abbildung 2.19 zeigt abschließend die Verkaufszahlen für Elektrofahrzeuge in den Top-Märkten 2013. Zusätzlich werden die am stärksten vertretenen Modelle dargestellt.



Abbildung 2.19: Verkaufszahlen in den Top-Märkten für Elektrofahrzeuge und die jeweils am stärksten vertretenen Modelle im Jahr 2013 (Daten: [57])

In den USA wurden 2013 knapp 100.000 Elektrofahrzeuge verkauft. Der Chevrolet Volt, baugleich mit dem Opel Ampera, sowie der Nissan Leaf waren die am häufigsten abgesetzten Modelle im US-Markt. Der Nissan Leaf zeigt sich auch in den übrigen Märkten als absatzstarkes Fahrzeug. Japan und die Niederlande konnten mit 30.000 bzw. 23.000 verkauften Fahrzeugen Platz zwei und drei der Top-Märkte im Jahr 2013 belegen. In Deutschland, das 2013 etwa 6.700 Elektrofahrzeuge in Betrieb nehmen konnte, kann für den Smart Fortwo als Spitzenreiter ein Anteil von 30 % festgestellt werden.

In Bezug auf die Situation der Elektromobilität im internationalen Kontext (Fahrzeuge und Infrastruktur) bleibt zusammenfassend ein hochdynamisches Verhalten festzuhalten. Die jeweiligen Märkte sind aufgrund sich rasch ändernder politischer Rahmenbedingungen und Vorgaben schnellen Veränderungen unterworfen, was z. B. die unterschiedlichen Entwicklungen in Deutschland verglichen mit den skandinavischen Ländern zeigen.

3 Räume im nationalen und internationalen Kontext

Dieses Kapitel befasst sich mit den Begriffsbestimmungen unterschiedlicher Raum- und Siedlungsstrukturen. Neben der Vorstellung von Grundbegriffen und aktueller Definitionen für Stadt und Land werden relevante Klassifizierungen von Raum- und Siedlungsstrukturen sowohl auf internationaler als auch nationaler bzw. deutscher Ebene diskutiert. Nach einer kurzen Beschreibung des Verkehrs- und Mobilitätsverhaltens in städtischen und ländlichen Siedlungsstrukturen folgt schließlich eine Kurzcharakterisierung der in dieser Arbeit untersuchten Fallbeispiele.

3.1 Grundbegriffe und Definitionen

Zunächst sind die zentralen Begriffe des städtischen und ländlichen Raumes und damit in Zusammenhang stehende Begriffe zu definieren und zu klären. Grundsätzlich ist sowohl die Definition der Stadt oder des städtischen Raumes als auch die Definition des ländlichen Raumes problematisch und mündet in keiner einheitlichen Begriffsbestimmung.

3.1.1 Stadt / Städtischer Raum

Der Begriff Stadt oder städtischer Raum kann auf Grundlagen verschiedener Kriterien definiert werden. Deshalb ist festzustellen, dass es genau genommen keine exakte und universell einsetzbare Beschreibung dieser Siedlungsstruktur gibt. Unterschiedliche Länder oder auch wissenschaftliche Disziplinen greifen auf verschiedene Grundlagen zur Beschreibung dieses Begriffes zurück. So kann der Stadtbe- griff historisch oder verwaltungsrechtlich motiviert sein oder aber auch auf der Bevölkerungszahl oder anderen charakteristischen Ausstattungsmerkmalen beruhen. Auch eine kombinierte Betrachtung verschiedener Kriterien ist zur Stadtdefinition möglich. [60]

Die am häufigsten anzutreffende Definition des Stadtbe- griffes legt Einwohnerzahlen zugrunde. Auch hier sind vergleichsweise große Unterschiede je nach Betrachtungs- region auszumachen. Folgende Einwohnerzahlen werden in Deutschland (Min- desteinwohnerzahl bei 2.000) zur Einordnung in unterschiedliche Stadtkategorien angewandt [60]:

- Landstadt: zwischen 2.000 und 5.000 Einwohner
- Kleinstadt: zwischen 5.000 und 20.000 Einwohner
- Mittelstadt: zwischen 20.000 und 100.000 Einwohner
- Großstadt: ab 100.000 Einwohner

Die Mindesteinwohnerzahlen sind auf internationaler Ebene deutlichen Schwankungen unterworfen. Für Griechenland, Malaysia oder die Schweiz gibt [60] Mindesteinwohnerzahlen von 10.000 an, während Island, Norwegen oder Spanien Ortschaften mit 200 Einwohnern bereits als Stadt deklarieren. Im Mittel liegen die Mindesteinwohnerzahlen jedoch zwischen 2.000 und 5.000.

Weltweit betrachtet werden Städte immer größer. Dieses Städtewachstum geht neben einer Vergrößerung der Fläche mit einer steigenden Einwohnerzahl einher. Bereits 2005 existierten weltweit mehr als 330 Städte mit einer Bevölkerung von mindestens einer Million Menschen [61]. Dieser Trend wird sich vermutlich in Zukunft weiter fortsetzen [62]. Aufgrund dessen ist es nur sinnvoll, neben den beschriebenen Stadtkategorien weitere Einordnungen vorzunehmen, die dem Phänomen größer werdender Stadtstrukturen gerecht werden. Auch dabei gibt es jedoch keine einheitlichen Definitionen. Millionenstädte, vereinzelt auch schon Städte ab 500.000 Einwohner, werden in der Regel als Metropolen bezeichnet, unter der Annahme, dass diese Städte wichtige politische und wirtschaftliche Funktionen in ihrem Land innehaben und diese sich dort konzentrieren. Gleichzeitig ergäbe sich aber somit für sehr große und bevölkerungsreiche Länder wie beispielsweise China eine Vielzahl von Metropolen, was dem Sinne der Metropolisierung, der Konzentration wichtiger Funktionen auf einige wenige Zentren, widerspricht. [60]

Größte städtische Siedlungsstrukturen gehören der Kategorie Megastadt oder Megacity an. Die Mindesteinwohnerzahl von Städten, spezifiziert als Megastädte, variiert je nach Definition zwischen fünf, acht und zehn Millionen, sodass auch in diesem Fall keine einheitliche Definition angegeben werden kann. Größtenteils sind sie monozentrisch aufgebaut, können aber auch polyzentrischer Struktur sein, wie vor allem die großen städtischen Regionen Chinas oder Japans zeigen. Vor allem in Asien und insbesondere in China ist unter dem Gesichtspunkt der Verstädterungstendenzen eine hohe Dynamik festzustellen. [60, 63]

Neben der quantitativen Charakterisierung durch Bevölkerungszahlen sind Megastädte wesentlich von qualitativen Eigenschaften geprägt. Grundsätzlich unterscheiden sich diese je nach Lage einer Megastadt (Industrieland, Entwicklungs- oder Schwellenland, entwickeltes Land). Einige ähnliche Entwicklungstendenzen zeichnet jedoch meist jede Megastadt aus [63]:

- Verstärkte Expansion des Stadtgebietes
- Entstehung von Suburbanisierungsprozessen und innerstädtischen Konsolidierungsprozessen

- Übernahme von Funktionen einer Primatstadt als größte Stadt eines Landes
- Anzeichen von ökologischen und infrastrukturellen und hier vor allem verkehrstechnischen Engpässen
- Veränderung von innerstädtischen Strukturen (Stadtzentrum)
- Entwicklung von polarisierten und zersplitterten Gesellschaften und zunehmender Verlust der Kontrolle mit steigender Formlosigkeit

Megastädte, die als weltweit bedeutende Zentren für Wirtschaft und Politik (z. B. als Finanzplätze oder als Sitz von Weltkonzernen) fungieren, sind darüber hinaus auch als Weltstädte zu bezeichnen [60, 63]. Nach [64] können Städte z. B. auch unter dem Gesichtspunkt der Mobilität als Städte in stabilem Zustand mit über Jahre gewachsenen Infrastrukturen und stabilem Modal-Split (Auto-Stadt: Los Angeles; ÖPNV-Stadt: Singapur (ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr); Hybrid-Stadt: Zürich) oder als sich entwickelnde Städte mit sich bildenden neuen Infrastrukturen und schwankenden Modal-Split-Verhältnissen (Nicht-motorisierte Stadt: Peking; Verkehrsgesättigte Stadt: Jakarta; Paratransit-Stadt: Johannesburg) klassifiziert werden.

In den World Urbanization Prospects [62] geben die Vereinten Nationen das weltweite städtische Bevölkerungswachstum an. Demnach haben sich bis zum Jahr 2014 weltweit 71 Megastädte herausgebildet (fünf bis zehn Millionen Einwohner: 43; mehr als zehn Millionen Einwohner: 28). Im Jahr 1990 waren insgesamt lediglich 31 Städte ab fünf Millionen Einwohner zu verzeichnen. Für 2030 wird prognostiziert, dass es 63 Städte mit einer Einwohnerzahl zwischen fünf und zehn Millionen bzw. 41 Städte ab zehn Millionen Einwohnern gibt. Diese beiden Kategorien werden etwa eine Milliarde Einwohner beherbergen (etwa ein Siebtel der derzeitigen Weltbevölkerung). Dies zeigt, dass zukünftig auch große Anstrengungen unternommen werden müssen, um Verkehrssysteme auf die sich verändernden Strukturen in den Städten anzupassen.

3.1.2 Land / Ländlicher Raum

Bis in die 1960er Jahre war der ländliche Raum noch von Homogenität geprägt und zeichnete sich durch eine vergleichsweise geringe Bevölkerungsdichte und die zentrale Stellung der Landwirtschaft aus [65]. Heutzutage sind jedoch eine exakte Definition bzw. die Erfassung sowie Abgrenzung des ländlichen Raumes aufgrund der gestiegenen Heterogenität derartiger Strukturen mit ihren unterschiedlichen Funktionen (bedingt durch vielfältige Veränderungsprozesse) ähnlich problematisch wie die Definition und Erfassung des Stadtbegriffes.

Dass ländliche Räume differenziert zu betrachten sind, zeigt beispielsweise die Unterscheidung zwischen fünf Typen ländlicher Räume auf Bundesebene im Raumordnungspolitischen Handlungsrahmen der Ministerkonferenz für Raumordnung 1995 [66]:

- Ländliche Räume in der Nähe von Agglomerationsräumen und großräumigen Verkehrsachsen
- Attraktive ländliche Räume für den Tourismus
- Ländliche Räume mit günstigen Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft
- Gering verdichtete ländliche Räume mit wirtschaftlicher Entwicklungsdynamik
- Strukturschwache periphere ländliche Räume

Trotz der zunehmenden Heterogenität des ländlichen Raumes, sind jedoch bestimmte Entwicklungstendenzen und Strukturmerkmale festzustellen, die typischerweise zur Beschreibung einer ländlichen Region geeignet sind. Folgende Aspekte führt [67] an:

- Dominanz des Landwirtschafts- und Agrarsektors, aber nicht flächendeckend bestimmend
- Ökologische Ausgleichsfunktion, die vom Rückgang anderer Indikatoren profitiert
- Einseitig gestaltete Wirtschaft, die von städtischen Regionen abhängig ist
- Schwacher Arbeitsmarkt und defizitäre Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten
- Etablierter Tourismus in ausgewählten Regionen
- Unterdurchschnittliche Infrastrukturausstattung (z. B. Bildung, Verkehr, technische Infrastruktur) und Dominanz des motorisierten Individualverkehrs (MIV)
- Extensive Flächennutzung (z. B. Nutzpflanzen)
- Negativer demographischer Wandel, Abwanderung und Überalterung
- Niedrige Geschossflächenzahlen und hohe spezifische Wohnflächen im Wohngebäudesektor

Auch Kapitel 3.2 wird zeigen, dass die Zuordnung einer Region zum ländlichen Raum von vielerlei Faktoren abhängt und in unterschiedlichen Ländern und Institutionen verschieden gehandhabt wird. So existieren ländliche Räume sowohl in Stadtnähe und zeigen andere charakteristische Merkmale auf als ländliche Räume, deren Abgelegenheit ausgeprägter ist und die weiter von städtischen Strukturen entfernt liegen. Eine festgelegte Begriffsbestimmung des ländlichen Raumes ist hier also nicht gegeben. Zudem machen eine weitere Expansion von Städten, Überschreitungen von administrativen Grenzen und Eingemeindungen eine Abgrenzung der Struktur Stadt gegenüber dem ländlichen Raum zunehmend komplexer. [60]

Dass der ländliche Raum zukünftig neben den fortschreitenden Entwicklungen in Städten ebenfalls weiter berücksichtigt werden muss und dabei die Daseinsvorsorge ein essentieller Gesichtspunkt sein muss, belegen auch Zahlen zur Fläche und Einwohner des ländlichen Raumes. So stehen ländliche Gebiete für 93 % der Fläche der EU-27 (27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union). Dort leben etwa 20 % der Einwohner. Der Anteil der erwirtschafteten Bruttowertschöpfung der EU-27 im ländlichen Raum liegt bei rund 50 %. Derselbe Anteil ist auch hinsichtlich der verfügbaren Arbeitsplätze festzuhalten, wobei das Pro-Kopf-Einkommen in Städten doppelt so hoch ausfällt wie auf dem Land. [68] Ländliche Räume sind also keineswegs zwangsläufig als strukturschwach oder rückständig einzustufen. Ein Raumbewertungskonzept, das den ländlichen Raum und dessen Merkmale vollständig erfasst und gleichzeitig regionale Unterschiede, Entwicklungen und die Umsetzung von Strategien berücksichtigt, erscheint also für die Zukunft sinnvoll. [65, 67]

3.1.3 Konzept der Stadtregion

Für die städtischen und ländlichen Strukturen kann zusammenfassend das in **Abbildung 3.1** dargestellte Konzept der Stadtregion in Deutschland angeführt werden.

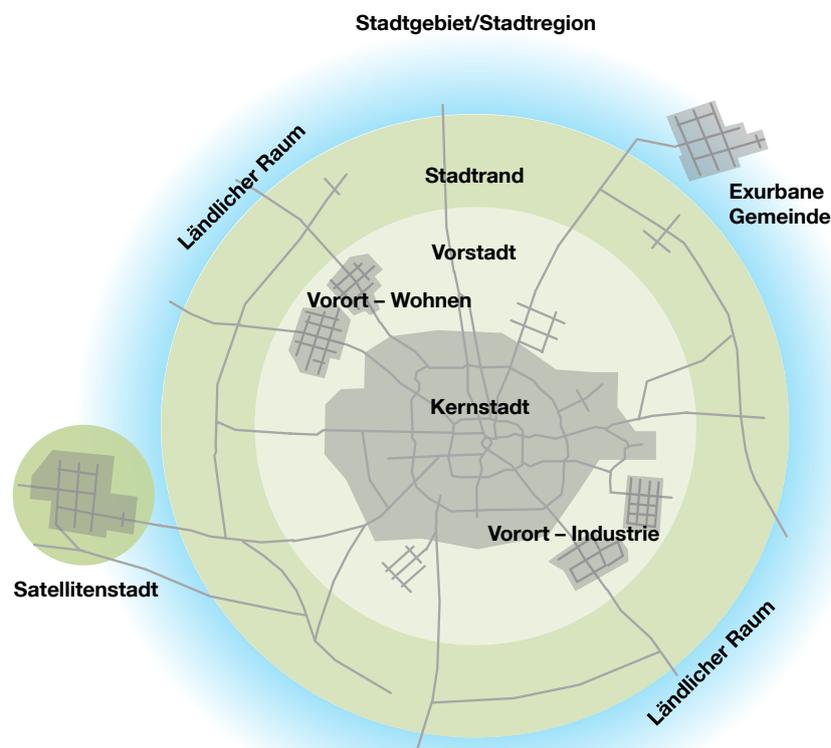


Abbildung 3.1: Konzept der Stadtregion in Deutschland, eigene Darstellung nach [60]

Die abgebildeten Zusammenhänge basieren auf dem Konzept der Metropolitan Statistical Area (MSA) der USA und betrachten als Grundlage für die Abgrenzung gegenüber dem ländlichen Raum nicht die administrativen Grenzen, sondern den gesamten ausgedehnten Ballungsraum. Dies erscheint insofern sinnvoll, als Städte einer immer größer werdenden Expansion unterworfen sind und damit die Abgrenzung zum ländlichen Raum erschwert wird. Verwaltungsgrenzen verlieren hiermit ihre Funktion als Bezugsgröße. Stattdessen gelten nach außen vorwiegend funktionale Verflechtungen wie Pendlerbewegungen als Abgrenzungskriterien. [60]

Abbildung 3.1 zeigt innerhalb des ersten Ringes die Kernstadt mit anschließender Vorstadtzone, welche industriell geprägte Vororte und Wohngebiete beinhaltet. Der Stadtrand oder die Randzone bildet die Abgrenzung zum ländlichen Raum. Funktionale Verflechtungen mit dem Agglomerationsraum bzw. der Kernstadt existieren mit Satellitenstädten sowie mit kleineren exurbanen Gemeinden, die bereits außerhalb des Stadtrandes liegen und zum Teil dem ländlichen Raum zugeordnet werden können.

3.2 Klassifizierungen von Raum- und Siedlungsstrukturen

Die Analyse städtischer und ländlicher Regionen in unterschiedlichen Ländern sowie der Vergleich untereinander auf nationaler oder internationaler Ebene machen eine Klassifizierung (Typologie) notwendig. Mehrere differenzierte Definitionen von Raum- und Siedlungsstrukturen können dabei zur Anwendung kommen. Die folgenden Ausführungen geben einen Einblick in die verschieden gearteten Kategorisierungen der OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development), der Europäischen Union (EU) sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung. Die große Bandbreite unterschiedlicher Klassifizierungen zeigt, dass eindeutige Zuordnungen bestimmter Regionen von vielen Faktoren abhängen, verschieden wahrgenommen werden können und somit nicht immer eindeutig sind.

3.2.1 Klassifizierung für OECD-Länder

Nachfolgende Erläuterungen stützen sich vorwiegend auf die Untersuchungen und Auswertungen in [69–71].

In jedem Mitgliedsland der OECD ist eine geografische Klassifizierung der Regionen durchgeführt worden. Regionen in OECD-Ländern können somit gemäß dieser Klassifizierung sinnvoller miteinander in Vergleich gesetzt werden. Die geografische Einteilung basiert prinzipiell auf zwei bzw. drei territorialen Ebenen (TL: Territorial Levels). Die oberste Ebene TL 1 entspricht den Staatsgrenzen der Länder. Die territori-

ale Ebene TL 2 gliedert sich derzeit in 363 Großregionen, wohingegen die Territorialebene 3 (TL 3) aus 1.802 kleineren Regionen besteht. Jede auftretende TL 3-Region ist Bestandteil einer Region der Territorialebene 2; alle Einheiten sind innerhalb der Staatsgrenzen eines Landes definiert. In den meisten Fällen entspricht die Einordnung der OECD nach TL 3 im Allgemeinen der administrativen Kategorisierung der Staaten. Dies trifft jedoch nicht auf Australien, Kanada, Deutschland und die USA zu. [69, 70]

Die Kategorisierung der OECD stimmt für europäische Länder weitestgehend mit der Klassifizierung der Europäischen Union (Eurostat) überein. Im Rahmen regionalpolitischer Maßnahmen wird deshalb die von den meisten Mitgliedsländern anerkannte Einordnung der OECD in zwei bzw. drei Territorialebenen als Leitlinie eingesetzt. In Deutschland steht die Territorialebene 2 für die 16 existierenden Bundesländer. Die territoriale Ebene 3 wird durch 96 Raumordnungsregionen repräsentiert. [69, 70]

Üblicherweise ist innerhalb der festgelegten geografischen Regionen desselben territorialen Levels in Hinblick auf die strukturelle Gestaltung (Bevölkerungsdichte, geografische Besonderheiten) ein heterogenes Verhalten festzustellen. Dies bei der Untersuchung von Regionen/Ländern zu berücksichtigen, ist ein wesentlicher Aspekt. Aufgrund dieser Heterogenität werden die Regionen der Territorialebene 3 gemäß einer regionalen Typologie weiter differenziert nach vorwiegend städtisch (predominantly urban [PU]), vorwiegend ländlich (predominantly rural [PR]) und intermediär (intermediate [IN]). Grundlage der Einordnung bilden hier die Bevölkerungsstruktur und der Anteil der in ländlichen Kommunen lebenden Bevölkerung. [69, 70]

Die Regionaltypologie der OECD basiert auf drei Kriterien [69, 70]:

- Identifizierung von ländlichen Kommunen gemäß Bevölkerungsdichte:
Eine Kommune wird als ländliche Kommune bezeichnet, wenn die Bevölkerungsdichte weniger als 150 Einwohner pro km² beträgt. Da in Japan und Korea die mittlere Bevölkerungsdichte auf nationaler Ebene 300 Einwohner pro km² überschreitet, wird der Schwellenwert für diese beiden Länder auf 500 Einwohner pro km² gesetzt.
- Klassifizierung der Regionen gemäß des Anteils der in ländlichen Gemeinden lebenden Bevölkerung:
Eine Region innerhalb der Territorialebene 3 wird folglich klassifiziert als:
 - Vorwiegend ländlich, wenn mehr als 50 % der Bevölkerung in ländlichen Gemeinden leben

- Vorwiegend städtisch, wenn weniger als 15 % der Bevölkerung in ländlichen Gemeinden leben
- Intermediär, wenn der Anteil der in ländlichen Gemeinden lebenden Bevölkerung zwischen 15 % und 50 % beträgt
- Größe des in der betrachteten Region liegenden städtischen Zentrums:
 - Eine Region, die nach den Kriterien 1 und 2 als ländlich klassifiziert würde, wird als intermediär eingestuft, wenn sie ein städtisches Zentrum mit mehr als 200.000 Einwohnern besitzt (500.000 für Japan), das nicht weniger als 25 % der Gesamtbevölkerung repräsentiert.
 - Eine Region, die nach den Kriterien 1 und 2 als intermediär klassifiziert würde, wird als vorwiegend städtisch eingestuft, wenn sie ein städtisches Zentrum mit mehr als 500.000 Einwohnern besitzt (1 Mio. für Japan), das nicht weniger als 25 % der Gesamtbevölkerung repräsentiert.

Die regionale Typologie steht nur für die Territorialebene 3 zur Verfügung, da aufgrund der Dimension der territorialen Ebene 2 die zusätzliche Kategorisierung nach vorwiegend städtisch, intermediär oder vorwiegend ländlich als zu aufwändig und daher nicht sinnvoll erscheint. Um für die Territorialebene 2 eine Einordnung nach vorwiegend städtisch, intermediär und vorwiegend ländlich vorzunehmen und die darin lebenden Bevölkerungsanteile zu bestimmen, sind die Bevölkerungsanteile in den TL 3-Regionen nach ihrem Regionstyp aufzusummieren. Insgesamt sind in allen drei Regionstypen der OECD sowohl ländliche als auch städtische Gemeinden vorzufinden, die jedoch in ihrem Vorkommen unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Eine Anwendung der beschriebenen Methodik auf Deutschland resultiert in 31 vorwiegend ländlichen Regionen (17,5 % der Gesamtbevölkerung), 30 intermediären Regionen (25,4 % der Gesamtbevölkerung) sowie 35 vorwiegend städtischen Regionen (57,1 % der Gesamtbevölkerung). Auf Bundeslandebene ergeben sich 8 intermediäre, 7 vorwiegend städtische und ein vorwiegend ländliches Land. [69, 70]

Eine erweiterte regionale Typologie wurde eingeführt, um zwischen ländlichen Regionen, die sich nah an Stadtzentren befinden, und abgelegeneren, von städtischen Zentren weiter entfernte Regionen zu unterscheiden. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der erweiterten Regionstypen der OECD ist in **Abbildung 3.2** schematisch beschrieben.

Die Klassifizierung von Regionen der Territorialebene 3 wird neben vorwiegend städtisch und intermediär somit u. a. durch die Kategorien vorwiegend ländlich mit Stadtnähe (predominantly rural regions close to a city [PRC]) und vorwiegend ländlich und abgelegen (predominantly rural remote regions [PRR]) ergänzt. Die relevante

Entfernung der entsprechenden Region zu einem städtischen Zentrum wird von der Fahrzeit bestimmt, die für einen bestimmten Anteil der in der Region lebenden Bevölkerung nötig ist (50 %), um dieses Zentrum zu erreichen. Die Population des zu erreichenden Stadtzentrums muss dabei mindestens 50.000 betragen. [69]

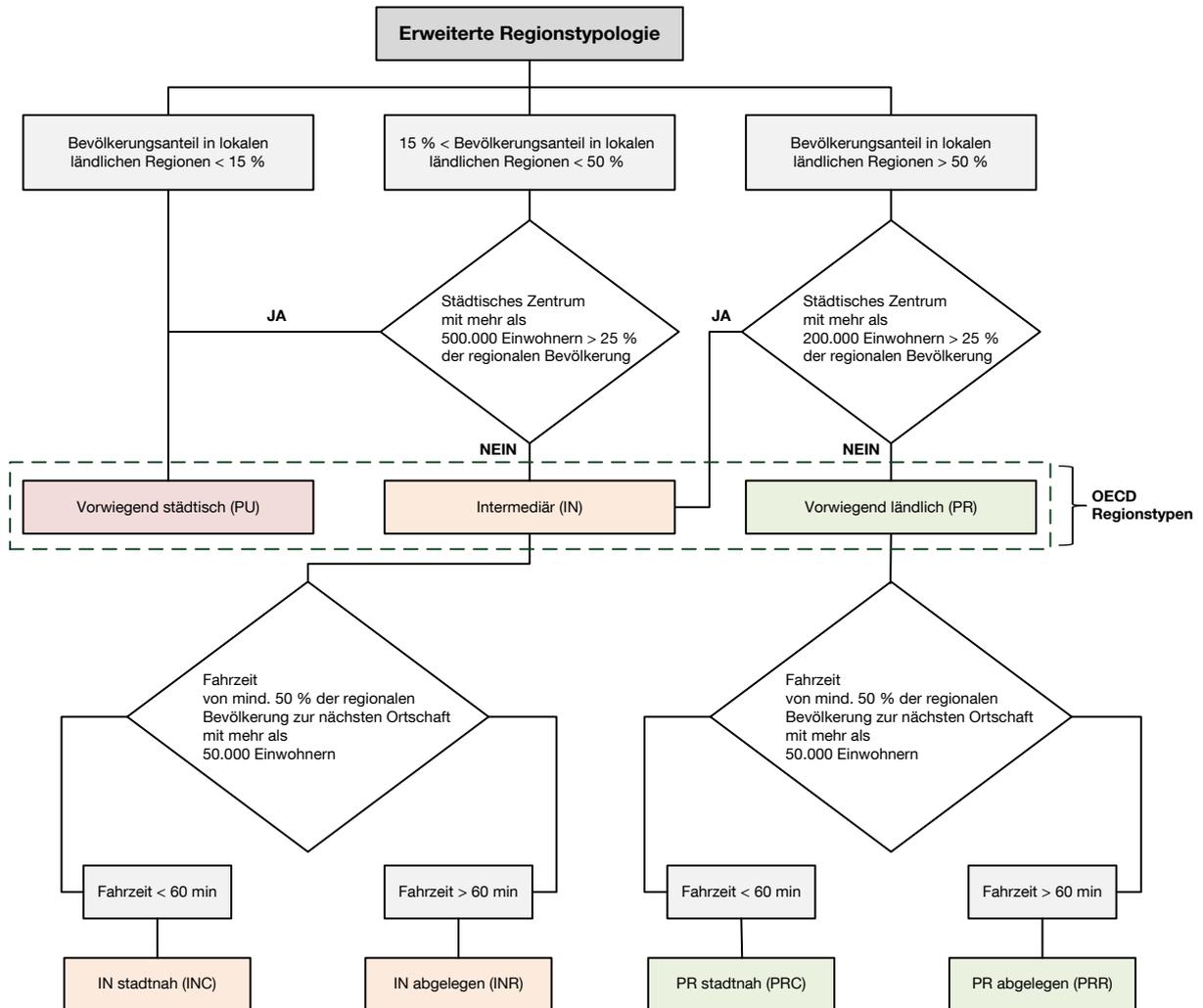


Abbildung 3.2: Methodik zur Bestimmung der erweiterten Regionstypologie, eigene Darstellung nach [69]

Neben der Methodik der OECD zur Bestimmung der Regionstypen bzw. der erweiterten Regionstypen werden außerdem funktionale städtische Gebiete definiert. Dies ist in Zusammenarbeit der OECD mit Eurostat und dem Directorate-General for Regional and Urban Policy geschehen. Demnach bestehen funktionale städtische Gebiete aus dicht besiedelten Kommunen (städtischer Kern) und angrenzenden Gemeinden, welche durch Pendlerverflechtungen wirtschaftlich stark in die städtischen Kerne integriert sind (Hinterland). Die administrativen Grenzen können gemäß dieser Definition außer Kraft gesetzt werden. Sie ist mit Ausnahme von Australien, Island,

Israel, Neuseeland und der Türkei für 29 OECD-Länder möglich und identifiziert somit 1.179 städtische Regionen unterschiedlicher Größe. [69, 71]

Grundsätzlich baut die Methodik auf drei Kriterien auf [69]:

- Identifizierung von städtischen Kernen:
Gerasterte Bevölkerungsdaten finden Anwendung, um verstädterte Regionen oder städtische, hochverdichtete Cluster innerhalb eines Landes zu definieren, wobei Verwaltungsgrenzen keine Berücksichtigung finden. Ein städtischer Kern besteht aus einem hochverdichteten Cluster zusammenhängender Rasterzellen mit 1 km² Größe und einer Dichte von mindestens 1.500 Einwohnern pro km² (für Kanada und USA gilt aufgrund weniger kompakter Stadtstrukturen ein Grenzwert von 1.000 Einwohner pro km²). Kleinere Cluster mit weniger als 50.000 Einwohnern (für Europa, USA, Chile und Kanada) bzw. 100.000 Einwohnern (für Japan, Korea und Mexiko) werden vernachlässigt. Eine Gemeinde wird als Bestandteil eines städtischen Kerns betrachtet, wenn mindestens die Hälfte der Gemeindebevölkerung innerhalb des gebildeten Clusters lebt.
- Verbindung nicht zusammenhängender, aber zum selben funktionalen Gebiet gehörender Kerne:
Zwei oder mehrere städtische Kerne gehören derselben polyzentrischen städtischen Region an, wenn mehr als 15 % der Bevölkerung aus jedem der Kerne in die jeweiligen anderen Kerne zum Zwecke der Arbeit pendeln.
- Identifizierung des Hinterlandes des funktionalen städtischen Gebietes:
Jede Gemeinde, deren Anteil der in einem städtischen Kern arbeitenden erwerbstätigen Bürger mindestens 15 % beträgt, ist Bestandteil des funktionalen städtischen Gebietes.

Funktionale städtische Gebiete mit mehr als 500.000 Einwohnern werden als Metropolregionen oder Ballungsgebiete definiert [69]. Die einzelnen vorzunehmenden Schritte zur Definition funktionaler städtischer Gebiete sind in **Abbildung 3.3** detailliert wiedergegeben.

In Deutschland existieren demnach 36 funktionale städtische Gebiete mit einer Bevölkerung von 50.000 bis 200.000 Personen (6,3 % der Gesamtbevölkerung), 49 funktionale städtische Gebiete, deren Einwohnerzahl zwischen 200.000 und 500.000 liegt (19,2 % der Gesamtbevölkerung) und 18 funktionale städtische Gebiete der Größe 500.000 bis 1 Mio. Einwohner (18,5 % der Gesamtbevölkerung). Im Bereich der funktionalen städtischen Gebiete mit mehr als 1,5 Mio. Einwohnern können in

Deutschland sechs Gebiete identifiziert werden (19,6 % der Gesamtbevölkerung).
[69]

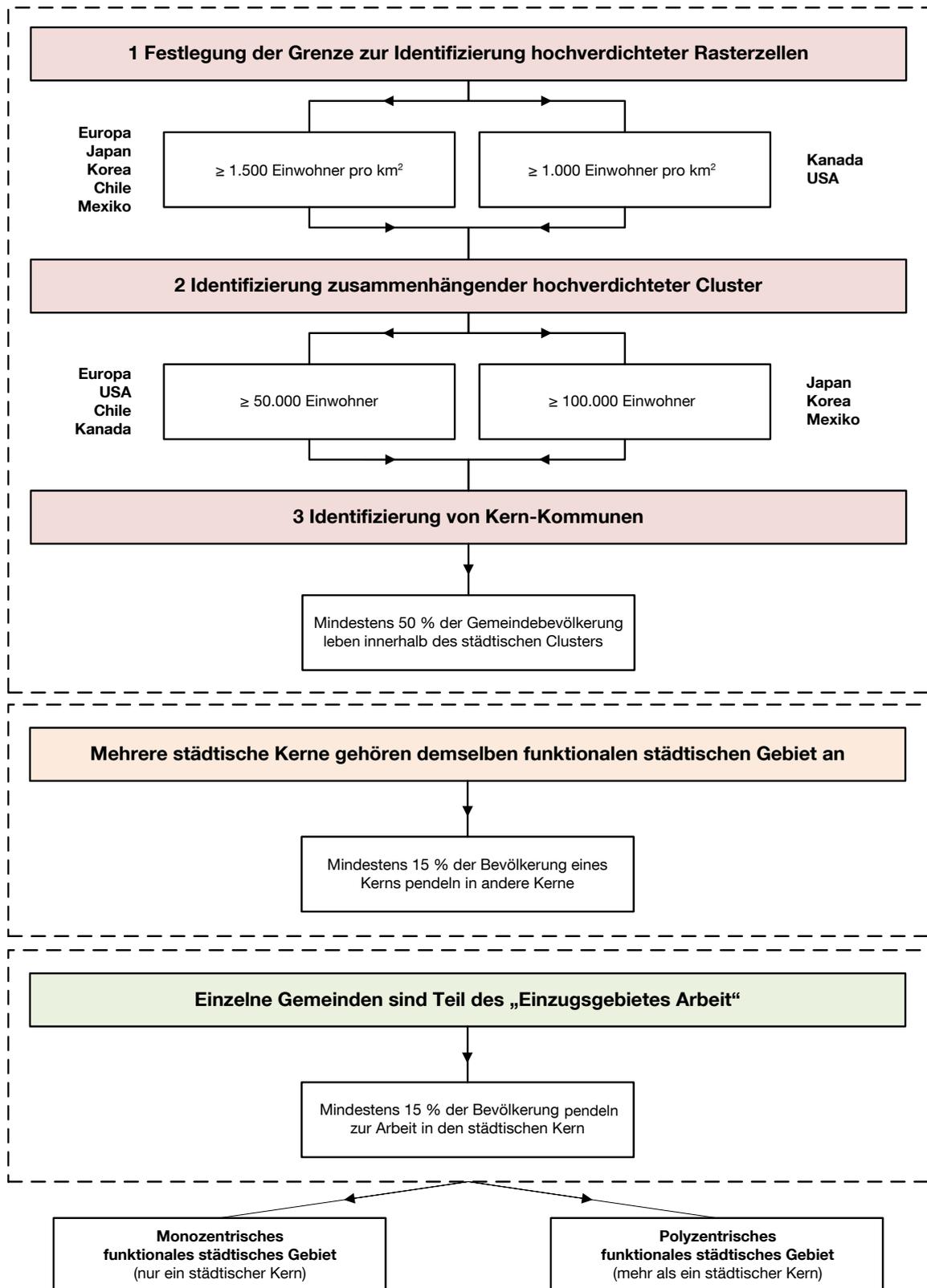


Abbildung 3.3: Methodik zur Bestimmung funktionaler städtischer Gebiete, eigene Darstellung nach [69]

3.2.2 Europäische regionalstatistische Gliederung

Die Darstellungen zur europäischen regionalstatistischen Gliederung in diesem Abschnitt lehnen sich überwiegend an [72–74] an.

Eine weitere Klassifizierung zur Identifizierung von Regionen und Räumen in den Mitgliedsländern der Europäischen Union ist durch die sogenannte Klassifizierung NUTS (frz.: Nomenclature des unités territoriales statistiques) gegeben. In Europa stimmt diese Klassifizierung im Allgemeinen mit der OECD-Definition von Regionen überein.

Die Nomenklatur wurde in den 1980er Jahren von Eurostat eingeführt, um eine gleichmäßige Aufschlüsselung regionaler Einheiten zur erleichterten Erstellung von Regionalstatistiken in der Europäischen Union zu schaffen und regionale Indikatoren festzulegen. Das System kann außerdem für sozioökonomische Analysen von Regionen und für Aktivitäten im Rahmen der europäischen Strukturpolitik bzw. Kohäsionspolitik zum Einsatz kommen. Seit 1988 ist diese Kategorisierung im Einsatz und wurde nach und nach aufgrund der Aufnahme weiterer Mitgliedsstaaten in die EU angepasst und erweitert. [72, 73]

Die NUTS-Klassifizierung führt eine Unterteilung des Gebietes der Mitgliedsländer einschließlich deren Außengebiete (Teile des Wirtschaftsgebietes, die keiner bestimmten Region zuzuordnen sind) durch. Dazu zählen z. B. Lufträume, Hoheitsgewässer, Botschaften oder Militärstützpunkte. Um Regionalstatistiken miteinander vergleichen zu können, muss eine gleichmäßige Verteilung der Bevölkerung über die entsprechenden Gebiete gewährleistet sein. Weitere zu beachtende Aspekte sind neben den politischen, administrativen und institutionellen Gegebenheiten wirtschaftliche, soziale, historische, kulturelle, geografische und ökologische Gesichtspunkte. [72]

Die regionalstatistische Gliederung besitzt eine hierarchische Struktur und definiert in jedem Mitgliedsstaat die drei regionalen Hierarchieebenen NUTS 1, NUTS 2 und NUTS 3. NUTS 3-Regionen sind Bestandteil von NUTS 2-Regionen, die wiederum innerhalb von NUTS 1-Regionen liegen. Die Landesgrenzen der Mitgliedsländer definieren die Ebene NUTS 0. Eine weitere Unterteilung der NUTS 3-Regionen ist den jeweiligen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union vorbehalten. [72]

Der hierarchische Aufbau und die immer feiner werdende geografische Einteilung der Mitgliedsstaaten durch die NUTS-Klassifizierung ist in **Abbildung 3.4** verdeutlicht.

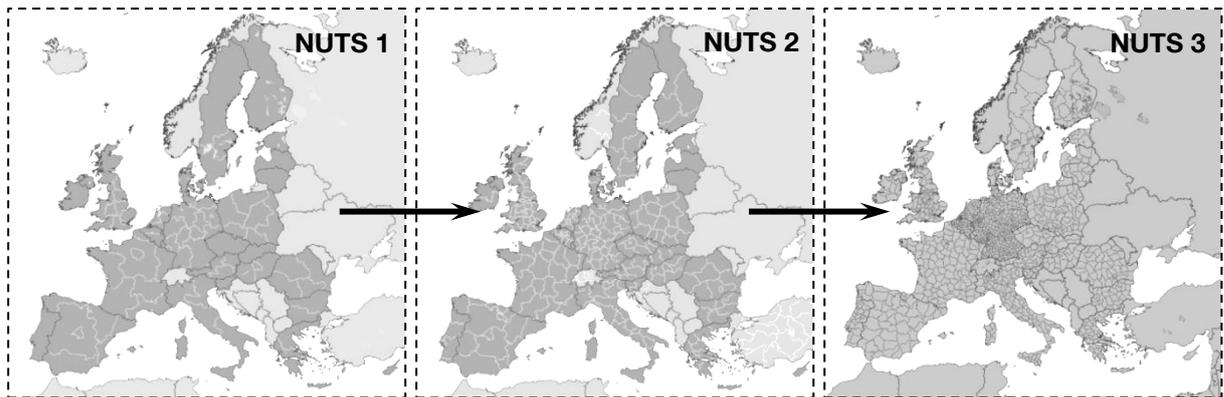


Abbildung 3.4: NUTS-Ebenen 1 bis 3 von links nach rechts in Europa [Janner CC BY-SA 2.5]

Ausgangspunkt zur Bestimmung der Einheiten eines Landes bietet die jeweilige administrative Gliederung (Verwaltungseinheiten). Ohne Berücksichtigung von Gemeinden verfügen alle Mitgliedsstaaten im Allgemeinen bereits über zwei regionale Hauptverwaltungseinheiten (z. B. Länder und Kreise in Deutschland). Innerhalb dieser Ebenen können weitere vergleichbare Einheiten aggregiert werden, die eine weitere Ebene bilden, sich aber an weniger wichtigen oder nicht existenten Verwaltungsstrukturen orientieren. [73]

Verwaltungseinheiten werden gemäß den Bevölkerungsgrenzen der NUTS 1-, NUTS 2- oder NUTS 3-Ebenen zugeordnet. Dabei sind Unter- und Obergrenzen als Richtwerte zu beachten. Eine Verwaltungseinheit wird der NUTS 1-Ebene zugeordnet, wenn die Bevölkerung des zu klassifizierenden Gebietes durchschnittlich zwischen 3 Mio. und 7 Mio. beträgt. Verwaltungseinheiten der NUTS 2-Ebene weisen eine Bevölkerungszahl zwischen 800.000 und 3 Mio. auf, während in NUTS 3-Regionen im Mittel zwischen 150.000 und 800.000 Menschen leben. [72, 73]

Eine zusätzliche statistische Ergänzung des NUTS-Systems stellen die beiden Ebenen LAU 1 (Local Administrative Unit; früher NUTS 4) und LAU 2 (früher NUTS 5) dar. LAU 1-Regionen finden ihre Entsprechung in den kommunalen Verwaltungseinheiten, die jedoch nicht für alle Mitgliedsstaaten festgelegt sind. Gemeinden oder äquivalente Einheiten bilden die untere lokale Hierarchieebene LAU 2. [72, 73]

Am Beispiel Deutschlands werden in **Tabelle 3.1** die Zusammenhänge der unterschiedlichen Hierarchieebenen nochmals zusammengefasst. Die NUTS-Klassifizierung ist lediglich für Mitgliedsstaaten der Europäischen Union definiert. Für andere Länder, die dem Europäischen Wirtschaftsraum angehören sowie für die Schweiz sind ähnliche Definitionen der Räume vorgenommen worden. [73]

Tabelle 3.1: Hierarchieebenen der Europäischen Union am Beispiel Deutschlands (Daten: [73, 74])

Ebene	Bezeichnung	Anzahl	Mittlere Bevölkerungsgröße	Mittlere Größe [km ²]
NUTS 1	Länder	16	5.152.000	22.314
NUTS 2	Regierungsbezirke	38	2.114.000	9.155
NUTS 3	Kreise/Kreisfreie Städte	412	192.000	832
LAU 1	Verwaltungsgemeinschaften	1.457	-	-
LAU 2	Gemeinden	12.379	-	-

3.2.3 Klassifizierung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung

Die ländlichen Räume betreffend existiert in Deutschland grundsätzlich keine bundesweit einheitliche Einteilungssystematik. Nicht zuletzt deshalb, weil auch die verschiedenen Bundesländer bei der Raumgliederung unterschiedliche Vorgehensweisen anwenden. Je nach Untersuchungszweck legt das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung differenzierte Raumeinteilungen zu Grunde, die auf Kriterien wie Siedlungsstruktur, Erreichbarkeit oder Raumfunktion basieren. [70]

Die Bevölkerungsdichte variiert stark innerhalb der Bundesrepublik Deutschland. Aus diesem Grund ist eine Kategorisierung verschiedener Regionen nach dem Kriterium der Siedlungsstruktur sinnvoll. Eine weit verbreitete hierarchische Klassifizierung in Deutschland, z. B. auch auf dem Gebiet der Verkehrsforschung, basiert auf den drei in **Abbildung 3.5** dargestellten Kategorien.

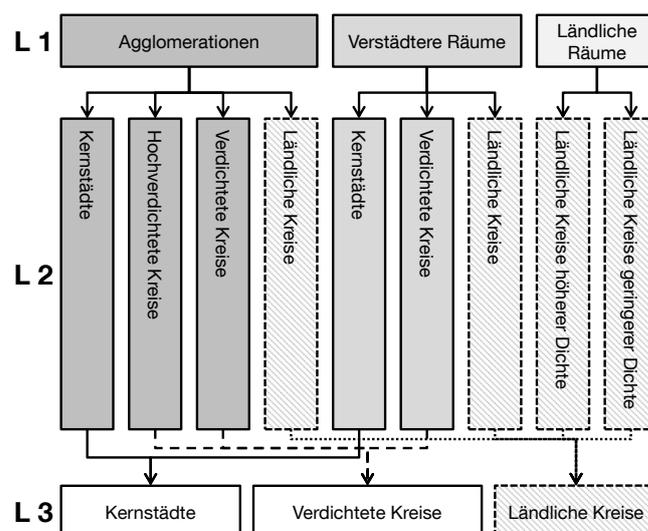


Abbildung 3.5: Klassifizierung von Siedlungsstrukturen in Deutschland, eigene Darstellung nach [70, 75, 76]

In Ebene 1 (L 1) befinden sich die drei Regionsgrundtypen in Deutschland (Agglomerationen, verstädterte Räume, ländliche Räume). Diese Typen können in untergeordnete Kategorien, in sogenannte Kreistypen, gegliedert werden (Ebene L 2). Mittels der drei aggregierten Kreistypen Kernstädte, verdichtete Kreise und ländliche Kreise (siedlungsstrukturelle Kreistypen) in Ebene 3 lassen sich schließlich vergleichende Analysen auf nationaler Ebene in Deutschland durchführen.

Abbildung 3.5 zeigt, dass die Struktur der Kernstädte sowohl in den Regionsgrundtypen der Agglomerationen als auch der verstädterten Räume zu finden ist, während ländliche Kreise in sämtlichen Regionsgrundtypen angesiedelt sind. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Nähe zu größeren Städten. Ländliche Kreise in Ballungsgebieten ermöglichen mehr Stadt-Land-Verbindungen im Vergleich zu ländlichen Kreisen in peripheren Räumen, wo aufgrund der relativen Abgelegenheit weniger Stadt-Land-Verbindungen möglich sind. [47, 75]

Kernstädte als aggregierter Kreistyp weisen eine Gesamtbevölkerung von mindestens 100.000 Einwohnern auf. Außerhalb von Kernstädten dient die Bevölkerungsdichte des betrachteten Kreises als Eckpfeiler für die Kategorisierung. Der aggregierte Kreistyp der verdichteten Kreise wird durch eine Bevölkerungsdichte von mindestens 150 Einwohnern pro km² charakterisiert, während zur Zuordnung zu ländlichen Kreisen das betrachtete Gebiet eine Einwohnerdichte von weniger als 150 Einwohnern pro km² aufzuweisen hat. Ländliche Kreise in Deutschland setzen sich neben ländlichen Kreisen aus Agglomerationen und verstädterten Räumen aus ländlichen Kreisen mit höherer Dichte bzw. geringerer Dichte (Regionsgrundtyp ländlicher Raum) zusammen. Ländliche Kreise geringerer Dichte sind gekennzeichnet von weniger als 100 Einwohnern pro km². Eine Dichte zwischen 100 und 150 Einwohnern pro km² ist für ländliche Kreise höherer Dichte festzustellen. [47, 70]

Obige Abbildung 3.5 beschreibt die siedlungsstrukturellen Kreistypen 2009. Die laufende Raubeobachtung führt jedoch immer wieder zu Anpassungen der regionalen Einteilung Deutschlands. Wurde in der Vergangenheit ein Top-Down-Ansatz verwendet, der die einzelnen Kreise abhängig vom Regionstyp und somit von der Lage bewertete, wurde in der Neutypisierung 2011 ein Bottom-Up-Ansatz gewählt. Zur Ermittlung des siedlungsstrukturellen Kreistyps fließen dabei nur siedlungsstrukturelle Merkmale ein. Die Bewertung der Lage und deren positiver bzw. negativer Einfluss werden über eine separate Typisierung erfasst und mit der Einteilung in siedlungsstrukturelle Kreistypen zusammengefasst. Gegenüber Abbildung 3.5 mit neun Kreistypen ergibt die Neutypisierung die Gruppen kreisfreie Großstädte, städtische

Kreise, ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen sowie dünn besiedelte ländliche Kreise (**Abbildung 3.6**, rechts). [77]

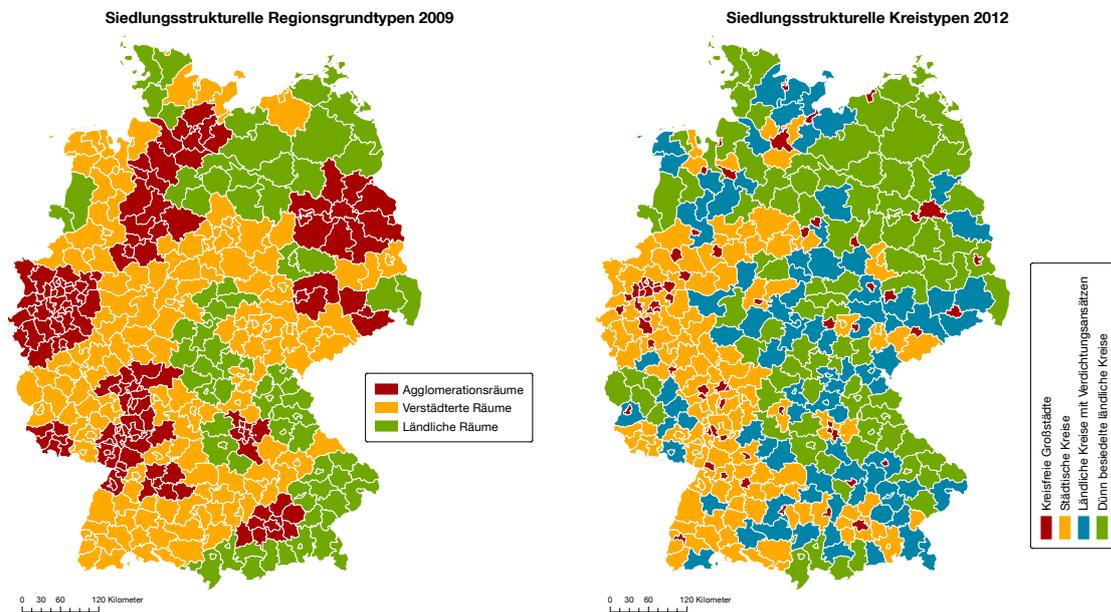


Abbildung 3.6: Siedlungsstrukturelle Regionsgrundtypen 2009 und siedlungsstrukturelle Kreistypen 2012 in Deutschland, eigene Darstellung (Daten: [77, 78])

3.3 Allgemeines Verkehrs- und Mobilitätsverhalten

Mobilität im Allgemeinen ist gekennzeichnet durch die Fähigkeit, in einer bestimmten Region verfügbare Aktivitäten durchzuführen. Ein zentrales Element für die Charakterisierung von Mobilität ist dabei z. B. die Bevölkerungsverteilung sowie die Verteilung von Arbeitsplätzen und entsprechenden Infrastrukturen. In Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte (Städte, Megastädte) können Wege in einfacher Weise innerhalb einer begrenzten räumlichen Distanz durchgeführt werden. Im Gegensatz zu diesen Siedlungsstrukturen müssen in dünn besiedelten Gebieten lange Wege zurückgelegt werden, um entsprechende Angebote nutzen zu können. Dies bedeutet, dass Raum- und Siedlungsstrukturen einen entscheidenden Einfluss auf den Verkehrsbedarf sowie auf das Verhalten der verschiedenen Verkehrsträger haben. So sind prinzipiell in Gebieten, gekennzeichnet von einer großen Bevölkerung in einem verhältnismäßig kleinen Areal, Vorzüge in der Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs festzustellen. In Einfamilienhaussiedlungen jedoch ist eine Erschließung erst durch die Nutzung des motorisierten Individualverkehrs möglich. [75]

In den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.2 werden die Besonderheiten städtischen und ländlichen Mobilitätsverhaltens anhand unterschiedlicher Mobilitätsdaten kurz erläutert und diskutiert.

3.3.1 Mobilitätsverhalten in städtischen Siedlungsstrukturen

In [79] wurden aufbauend auf den Datensätzen „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD), „National Household Travel Survey 2009“ (NHTS) für die USA sowie zum Teil „Household Interview Travel Survey 2012“ (HITS) für Singapur die wesentlichen Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens in Städten und in ländlichen Regionen erarbeitet und einem Vergleich unterzogen.

Um eine Gegenüberstellung des Verhaltens in unterschiedlichen Räumen durchzuführen, sind die entsprechenden Beschreibungsgrößen wie durchschnittliche Wegezähl pro Tag, Weglänge, Wegedauer, Unterwegszeit oder die durchschnittliche Pkw-Anzahl pro Haushalt zu ermitteln. Für deutsche Kernstädte nach Abbildung 3.5 in Agglomerationsräumen und verstäderten Räumen sind die wesentlichen Mobilitätsgrößen in **Abbildung 3.7** zusammengefasst. Zusätzlich sind die mittleren Zahlen für Kernstädte in Deutschland sowie Zahlen für US-amerikanische Städte am Beispiel New York vergleichend miteinbezogen.

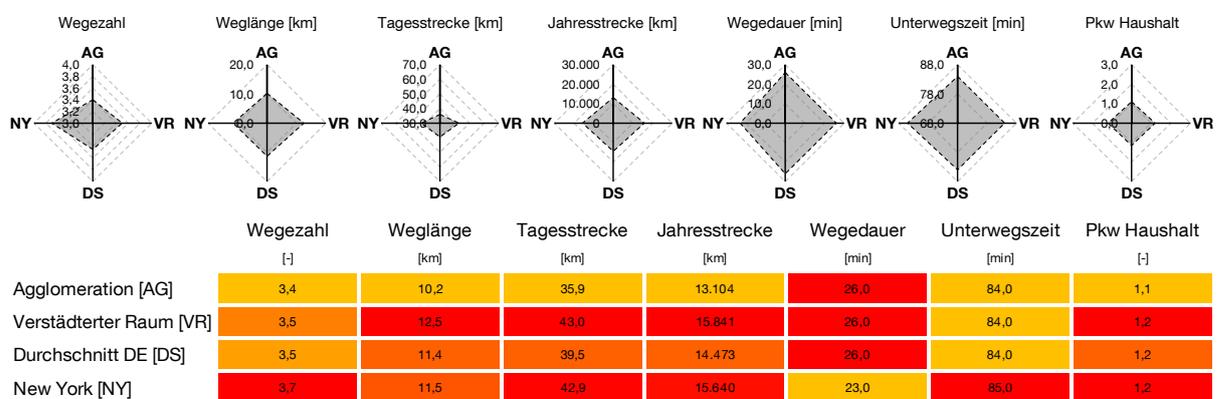


Abbildung 3.7: Zentrale Mobilitätsgrößen von Kernstädten in unterschiedlichen Regionsgrundtypen und von New York (Daten: [47, 75, 79])

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Einfluss der Lage der Kernstadt vergleichsweise gering ausfällt. Die Wegezähl liegt im Durchschnitt bei 3,5 in Deutschland. Die durchschnittlichen Weglängen unterscheiden sich zwischen Kernstädten in Agglomerationen und verstäderten Räumen geringfügig. Dies äußert sich in verstäderten Räumen jedoch in einer deutlich größeren Tagesstrecke und somit Jahresstrecke im Vergleich zu Agglomerationen. Die Dauer eines Weges, die Unterwegszeit sowie die

Anzahl der pro Haushalt verfügbaren Pkw unterscheiden sich nicht. Ferner kann obiger Abbildung 3.7 entnommen werden, dass auch städtische Strukturen in den USA (hier das Beispiel New York) weitestgehend dem deutschen bzw. europäischen Verhalten folgen und ähnliche Mobilitätskenngrößen aufweisen. Bei Betrachtung typischer Autostädte in den USA dürfte der Unterschied zu Deutschland allerdings deutlich klarer ausfallen. Dass Kernstädte innerhalb der verschiedenen Regionsgrundtypen (sowie auch in den USA) insgesamt im Mobilitätsverhalten nur geringe Abweichungen voneinander zeigen, wird auch bei Betrachtung der zusätzlich abgebildeten Netzdiagramme für jede einzelne Kenngröße deutlich.

3.3.2 Mobilitätsverhalten in ländlichen Siedlungsstrukturen

Ländliche Kreise sind in Deutschland in sämtlichen Siedlungsstrukturen der Agglomerationsräume, der verstädterten Räume und der ländlichen Räume enthalten. In ländlichen Räumen wird zwischen ländlichen Kreisen geringerer Dichte (L1 in untenstehender Grafik) und ländlichen Kreisen höherer Dichte (L2) unterschieden (Einwohnerschwellwert: 100 Einwohner pro km²). Eine Übersicht über die wichtigsten Mobilitätskenngrößen in ländlichen Kreisen bietet **Abbildung 3.8**. Auch hier ist neben den Durchschnittswerten für Deutschland das Beispiel New York (Umland) in die Übersicht eingebunden.

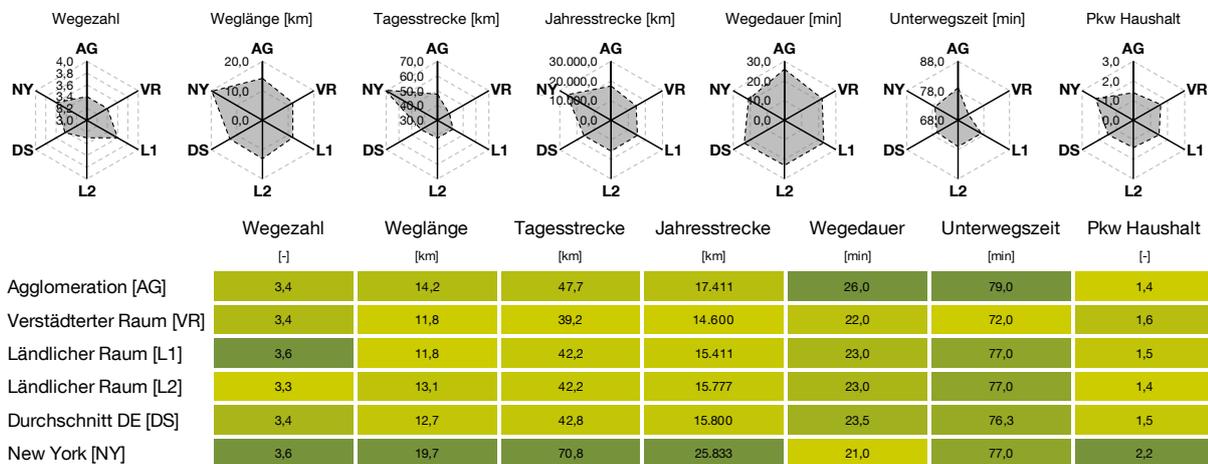


Abbildung 3.8: Zentrale Mobilitätsgrößen von ländlichen Kreisen in unterschiedlichen Regionsgrundtypen und von New York (Daten: [47, 75, 79])

Die Grafik zeigt, dass ländliche Kreise in Agglomerationsräumen gegenüber ländlichen Kreisen in verstädterten Räumen oder ländlichen Räumen deutlich erhöhte Mobilitätskenngrößen aufweisen. Die mittlere Weglänge beträgt 14,2 km. Infolge der höheren Bevölkerungsdichte kommt es zudem zu einer erhöhten Wegedauer und

somit Unterwegszeit. Durchschnittlich legt eine Person in ländlichen Kreisen 3,4 Wege pro Tag zurück, wobei die mittlere Weglänge 12,7 km beträgt. Die Wegedauer liegt bei 23,5 min. Im Schnitt verfügt ein Haushalt in ländlichen Kreisen über 1,5 Pkw. Der ländliche Raum um die Metropolregion New York folgt nur bedingt dem Mobilitätsverhalten ländlicher Kreise in Deutschland (siehe auch Netzdiagramme). In Hinblick auf städtische Strukturen ist dieser Effekt für das Beispiel New York jedoch nicht festzustellen. Auffallend sind für das US-amerikanische Beispiel zum einen die hohen mittleren Weglängen von knapp 20 km, zum anderen die Zahl der pro Haushalt verfügbaren Pkw, die durchschnittlich bei 2,2 liegt.

Es kann festgehalten werden, dass über sämtliche Kernstädte und ländliche Kreise in den Regionsgrundtypen der Agglomerationen, verstädterten Räumen und ländlichen Räumen gemittelt die Differenzen nur sehr gering ausfallen. Hinsichtlich der mittleren Wegezahl legt eine Person in der Stadt 3,5 Wege zurück, eine Person im ländlichen Raum 3,4. Auch das Argument der deutlich größeren durchschnittlichen Weglängen im ländlichen Raum und der damit ungenügenden Eignung von Elektrofahrzeugen (Reichweitenproblem) kann dieser erste Vergleich der Mobilitätskenngrößen zwischen Stadt und Land nicht bestätigen. In ländlichen Kreisen fallen die mittleren Weglängen, Tagesstrecken und Jahresstrecken nur etwa 10 % höher aus verglichen mit städtischen Kenngrößen. Die Wegedauer im ländlichen Raum ist aufgrund der geringeren Bevölkerungsdichte und der verstärkten Nutzung des Pkw wesentlich kürzer als die in deutschen Kernstädten festgestellten mittleren Wegedauern von 26 min. Insgesamt wird in ländlichen Kreisen eine größere Strecke in kürzerer Zeit zurückgelegt. Die Anzahl der Pkw pro Haushalt ist im ländlichen Raum mit 1,5 Pkw pro Haushalt deutlich höher als die Anzahl der verfügbaren Pkw in einem städtischen Haushalt. Die Verringerung der Bevölkerungsdichte von Kernstädten in Agglomerationsräumen hin zu ländlichen Kreisen geringerer Dichte in ländlichen Räumen führt grundsätzlich zu einer Steigerung der mittleren Weglängen, Tagesstrecken und Jahresstrecken sowie der Anzahl der pro Haushalt verfügbaren Pkw bei einer gleichzeitigen Abnahme der Wegedauern und der Unterwegszeit.

Der Einfluss der Siedlungsstruktur und der abnehmenden Einwohnerdichte auf den Modal Split (hier am Beispiel des Verkehrsaufkommens) wird in **Abbildung 3.9** deutlich. Zusätzlich sind auch hier erneut die Daten für städtische und ländliche Strukturen in den USA aufgetragen. Der Modal Split für die Verkehrsleistung folgt ähnlichen Mustern.

Auffallend ist zunächst der signifikante Anteil des öffentlichen Personennahverkehrs in Kernstädten allgemein, der durch ein besser ausgebautes ÖPNV-Angebot im Ver-

gleich zu ländlichen Regionen zustande kommt. In den verbleibenden Kreistypen ist der Anteil des ÖPNV weniger bedeutend ausgeprägt. Der öffentliche Personenfernverkehr (ÖPFV) spielt in sämtlichen Typen nur eine untergeordnete Rolle.

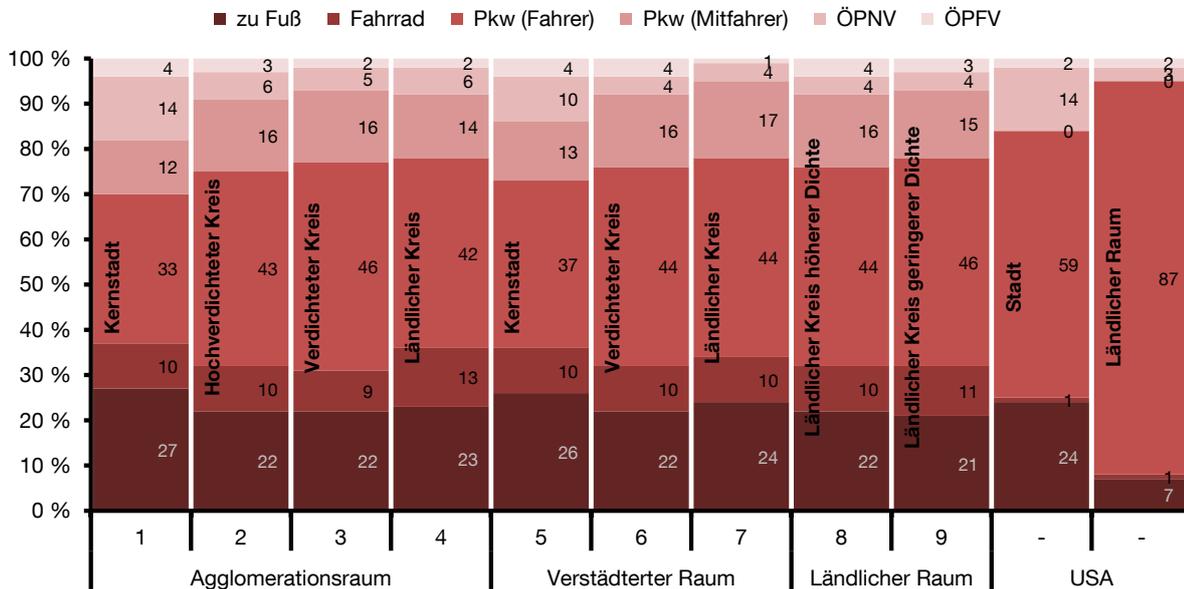


Abbildung 3.9: Modal Split für Verkehrsaufkommen in unterschiedlichen Kreistypen in Deutschland und in den USA (Daten: [47, 75, 79])

Der Anteil des Individualverkehrs (Pkw und Pkw (Mitfahrer)) hingegen ist vor allen Dingen in den ländlichen Kreisen charakterisierend. Mehr als 6 von 10 Wegen werden somit in ländlichen Kreisen der ländlichen Räume mit dem Pkw zurückgelegt. In Kernstädten der Agglomerationsräume liegt diese Zahl bei lediglich 4,5 Wegen. Der Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege schwankt nur wenig über die unterschiedlichen Kreistypen, genauso die zu Fuß durchgeführten Wege. Allein in dichter besiedelten Gebieten und Städten ist aufgrund der höheren Arbeitsplatzdichte und des größeren Angebotes von Einrichtungen für das tägliche Leben der Anteil der zu Fuß zurückgelegten Wege erhöht. Die zusätzlich abgebildete US-amerikanische Situation in Städten und auf dem Land macht nochmals die große Bedeutung des Pkw in den USA deutlich. Im ländlichen Bereich der USA wird der Pkw für knapp 90 % aller Wege eingesetzt, in Städten für knapp 60 %. Eine Differenzierung der Daten nach Pkw (Fahrer) und Pkw (Mitfahrer) findet hierbei jedoch nicht statt. Die Nutzung des ÖPNV ist vergleichbar mit den Gegebenheiten in Deutschland. Auffallend ist vor allen Dingen die geringe Nutzung des Fahrrades in den USA.

Die Frage nach dem durchschnittlichen Zeitpunkt eines Wegestarts in Deutschland und die potentielle Nutzung eines Verkehrsmittels abhängig von der Tageszeit kann

Abbildung 3.10 beantworten. Sie zeigt die typische Verteilung der Startzeitwahrscheinlichkeit für Werktage, Samstag und Sonntag.

Charakteristisch für derartige Verteilungen (Werktage) sind zwei Extremwerte morgens (Wege/Fahrten zur Arbeit/Ausbildungsstätte) und spätnachmittags/abends (Rückkehr nach Hause). In den Nachtstunden nach 22 Uhr bis etwa 4 Uhr sind kaum durchgeführte Wege feststellbar, während in der verbleibenden Zeit ein konstanter Verkehr angenommen werden kann.

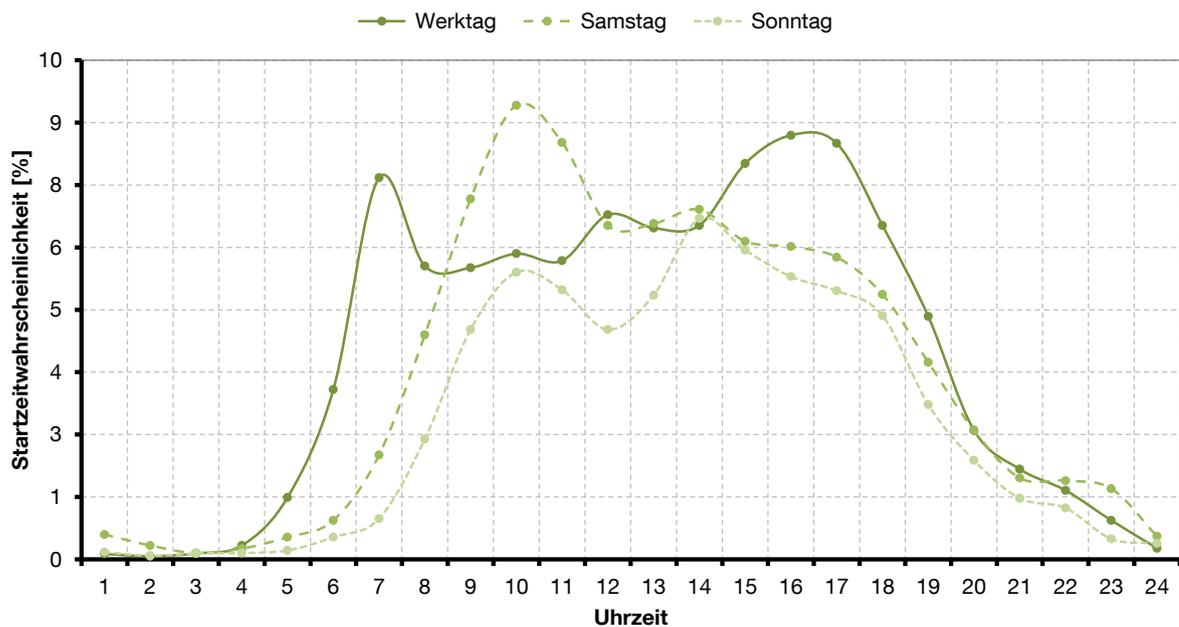


Abbildung 3.10: Startzeiten der Wege nach Wochentagen im bundesdeutschen Durchschnitt (Daten: [75])

Abbildung 3.10 zieht zur Ermittlung der Wegestartwahrscheinlichkeit die gesamte Bevölkerung heran und führt eine Mittelung aller Startzeiten durch. Eine Auswertung spezifischer Daten zur Erstellung von Bewegungsprofilen typischer Haushalte in Deutschland, den USA und Singapur für städtische und ländliche Siedlungsstrukturen wurde in [79] durchgeführt. Die dort ermittelten Daten sind aufbereitet in Form von Bewegungsprofilen in **Abbildung 3.11** visualisiert.

Für sämtliche Regionen ist eine typische Familie als repräsentativer Haushalt aus den oben erwähnten Datensätzen ausgewählt worden. Der Haushalt besteht in jeder Region aus zwei erwachsenen (P1, P2) sowie zwei minderjährigen Haushaltsmitgliedern (P3, P4). Die Auswahl des Haushaltes aus dem Datensatz erfolgt anhand der Übereinstimmung verschiedener Mobilitätskenngrößen für den Haushalt mit dem jeweiligen arithmetischen Mittel der entsprechenden Größe [79].

Ein Bewegungsprofil gliedert sich in verschiedene Wege, die über den Tag verteilt durchgeführt werden und in Abbildung 3.11 als zweigeteilter Block dargestellt sind. Ein Weg wird charakterisiert durch eine Wegnummer, durch ein Verkehrsmittel und einen Zweck, gekennzeichnet durch unterschiedliche Farben. Zusätzlich ist für jeden Weg die Distanz sowie die Start- und Endzeit angegeben. In Deutschland wird hinsichtlich der Verkehrsmittelwahl zwischen Pkw und Pkw als Mitfahrer unterschieden. Diese Unterscheidung ist in den Daten für die USA und Singapur nicht hinterlegt.

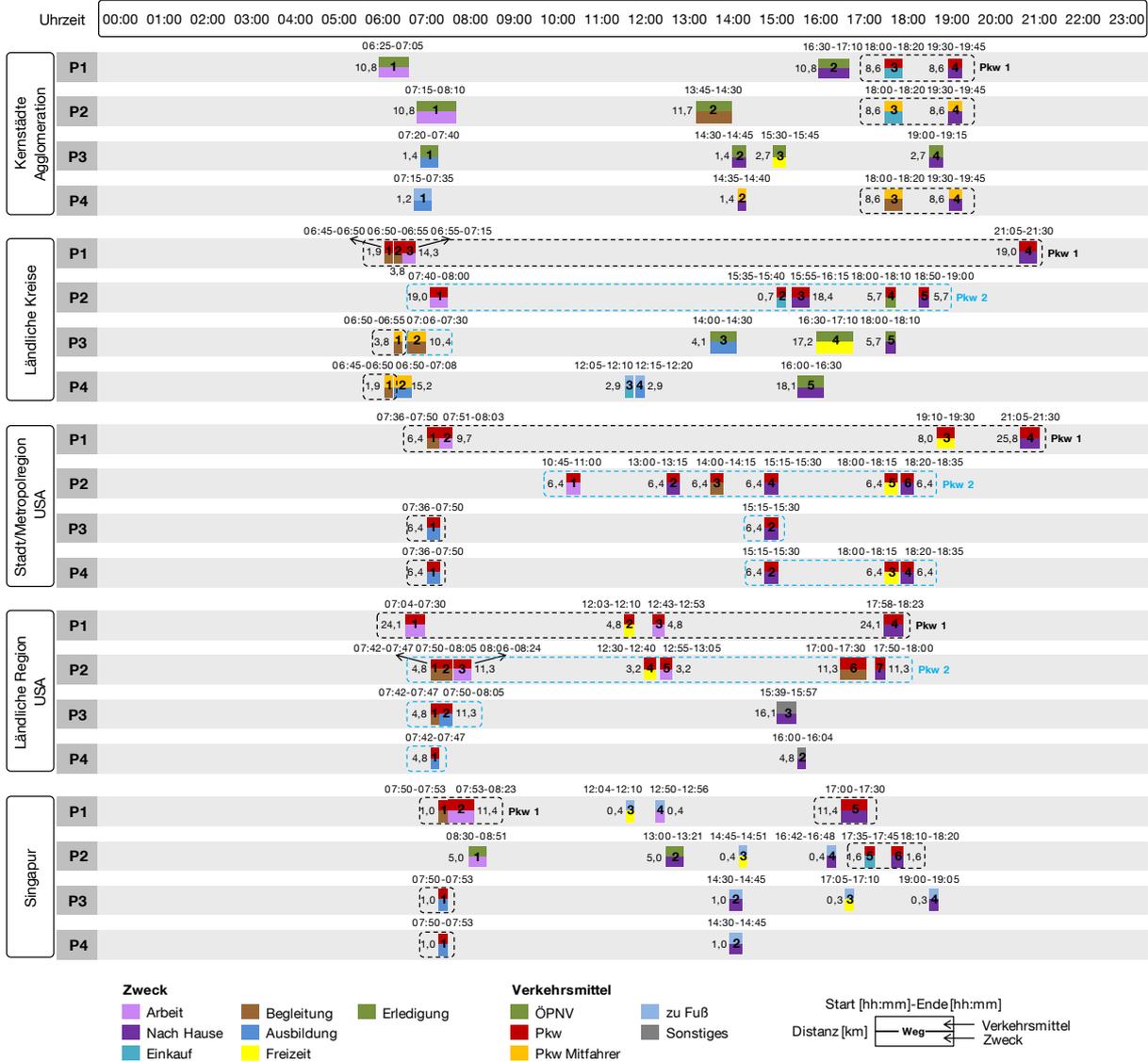


Abbildung 3.11: Bewegungsprofile eines typischen Haushaltes für Werktage in unterschiedlichen Regionen in Deutschland, den USA und Singapur (Daten: [75, 79])²

² Aufgrund einer im Vergleich zu Deutschland und den USA weniger umfassenden Datengrundlage für Singapur basiert das ermittelte Bewegungsprofil des singapurischen Haushaltes zum Teil auf Annahmen und lehnt sich an Profile für deutsche und US-amerikanische Städte an.

Der ausgewählte Haushalt in Deutschland für eine Kernstadt im Agglomerationsraum besitzt einen Pkw, der zwischen 18:00 Uhr und 19:45 Uhr von drei Familienmitgliedern zum Zwecke des Einkaufs gemeinsam genutzt wird. Das Haushaltsmitglied P1 erreicht den Arbeitsplatz mithilfe öffentlicher Verkehrsmittel und nutzt diese ebenfalls für den Heimweg. Das Haushaltsmitglied P2 legt täglich vier Wege zurück und nutzt dabei für den Arbeitsweg den öffentlichen Personennahverkehr. P3 und P4 stehen für die minderjährigen Haushaltsmitglieder. Für die Zwecke Ausbildung, Freizeit und nach Hause-Wege wird zum einen der ÖPNV genutzt, zum anderen der Pkw als Mitfahrer. Insgesamt ist die Nutzung des Verkehrsmittels in städtischen Regionen vergleichsweise diversifiziert, da von einem ausreichend ausgebauten ÖPNV-Netz ausgegangen werden kann, welches für Arbeits- und Ausbildungswege zur Verfügung steht.

Gegenüber den Kernstädten in Agglomerationsräumen starten die Wege in ländlichen Kreisen in Deutschland insgesamt früher. Zudem wird deutlich, dass der Pkw eine bedeutende Rolle einnimmt und für deutlich mehr Wege zum Einsatz kommt. P1 nutzt den Pkw 1 für Fahrten zur Arbeit und nach Hause, nachdem bereits zuvor die minderjährigen Haushaltsmitglieder zur Ausbildungsstelle begleitet worden sind. Dies geschieht zudem auch mit dem Pkw 2, den das Haushaltsmitglied P2 den ganzen Tag über für Fahrten zur Arbeit, nach Hause oder für Erledigungen nutzt. Weiter bleibt festzuhalten, dass vor allem die minderjährigen Haushaltsmitglieder zum Zwecke der Ausbildung oder der Freizeit auf den ÖPNV zurückgreifen oder Wege zu Fuß zurücklegen. Auch im ländlichen Raum ist meist eine öffentliche Verbindung mit Bussen zu Ausbildungsstätten morgens und nachmittags gewährleistet.

Der stellvertretend für US-amerikanische Metropolregionen ausgewählte Haushalt zeigt eine enorme Abhängigkeit vom motorisierten Individualverkehr und unterstreicht die Bedeutung des Pkw in den USA. Auch hier besitzt der Haushalt zwei Pkw. Obwohl die Familie im städtischen Bereich angesiedelt ist, sind weitere Verkehrsmittel oder die Nutzung des ÖPNV keine Option zur Durchführung der täglichen Wege. Im Vergleich zu Deutschland starten die Wege morgens insgesamt deutlich später. Der Pkw 1 wird vom erwachsenen Haushaltsmitglied P1 genutzt, um die Kinder zur Ausbildungsstätte zu bringen und anschließend zum Arbeitsplatz zu fahren. Zwei weitere Wege (Freizeit, nach Hause) werden im weiteren Tagesverlauf mit dem Pkw durchgeführt. P2 kann ganztägig über den Pkw 2 verfügen, der zu Fahrten zur Arbeit und zurück sowie zum Abholen der Kinder von den jeweiligen Ausbildungsstätten zum Einsatz kommt. Die minderjährigen Haushaltsmitglieder führen sämtliche Wege in Pkw als Mitfahrer durch und nutzen in diesem Fall auch für

Schul- und Ausbildungswege keine öffentlichen Verkehrsmittel. Für Beispielfamilien in US-amerikanischen Stadtzentren mit der Möglichkeit von Bus- und Bahnnutzung dürfte für Arbeits- oder Ausbildungswege natürlich auch ein bestimmter Anteil auf den öffentlichen Personennahverkehr entfallen.

Dieses Verhalten kann im Grunde auch auf eine Familie übertragen werden, die in einer ländlichen Region in den USA lebt. Auch hier werden im Allgemeinen zwei Pkw genutzt, um die innerhalb eines Tages anfallenden Wege zu absolvieren. Insgesamt verfügt die hier abgebildete Familie jedoch über vier Pkw. Das Haushaltsmitglied P1 nutzt den motorisierten Individualverkehr, um Wege in die Arbeit und nach Hause abzudecken. Das Haushaltsmitglied P2 begleitet die minderjährigen Familienmitglieder mit dem Pkw 2 zu ihren Ausbildungsstätten und fährt danach seine Arbeitsstätte an. Zusätzlich werden Wege zum Zwecke der Freizeit sowie nach Hause-Wege mit dem Pkw durchgeführt.

Das Beispiel eines Singapurischer Bewegungsprofils basiert auf Abschätzungen und Annahmen. In Singapur legt das Haushaltsmitglied P1 insgesamt fünf Wege pro Tag zurück und nutzt dabei hauptsächlich das zur Verfügung stehende Auto, um in die Arbeit, nach Hause oder die minderjährigen Familienmitglieder zur Ausbildungsstätte zu fahren. In der Mittagszeit werden Wege zu Fuß durchgeführt. Das Haushaltsmitglied P2 nutzt hauptsächlich den in Singapur gut ausgebauten ÖPNV und greift nach Rückkehr von P1 von der Arbeit auf den Pkw zurück. Die minderjährigen Personen P1 und P2 legen Wege überwiegend auch zu Fuß zurück. Insgesamt spielt in Singapur die Nutzung des eigenen Fahrzeuges eine weniger bedeutende Rolle, auch aufgrund der strikten Verkehrspolitik hinsichtlich des singapurischen Pkw-Bestandes.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die in Abbildung 3.11 dargestellten Bewegungsprofile den Tagesablauf einer ausgesuchten Familie repräsentieren, die dem Durchschnitt des Verhaltens der gesamten Bevölkerung am nächsten kommt. Die Daten sollen daher nur grundsätzliche Tendenzen zum Mobilitätsverhalten von Familien in unterschiedlichen Strukturen liefern.

3.4 Kurzcharakterisierung der Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete in dieser Arbeit, die später in Kapitel 5 als Fallbeispiele Anwendung finden, werden so gewählt, dass verschiedene Raum- und Siedlungsstrukturen (von Megastadt bis ländlicher Raum) abgedeckt werden und die darin auftretenden charakteristischen Kenngrößen hinsichtlich der zu untersuchenden Kriterien abgeleitet werden können.

Als Fallbeispiele finden die südostasiatische Stadt Singapur, die Stadt Frankfurt am Main in Hessen, die oberbayerische Stadt Ingolstadt sowie die ländlich geprägte Marktgemeinde Schöllnach in Niederbayern Anwendung. **Abbildung 3.12** verdeutlicht die Lage der einzelnen Untersuchungsregionen in Deutschland und Asien.

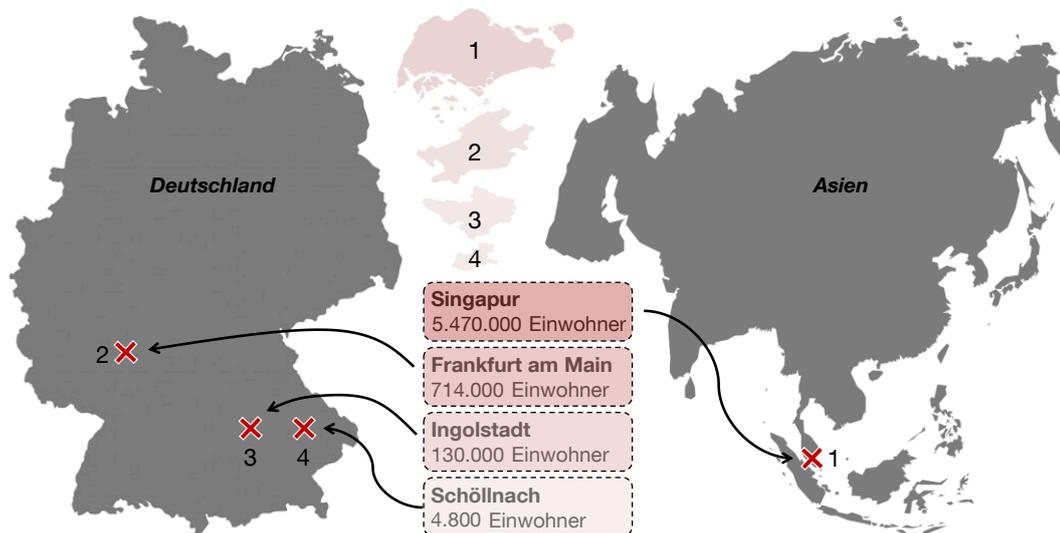


Abbildung 3.12: Untersuchungsregionen in Deutschland und Asien

In den folgenden Abschnitten werden die ausgewählten Untersuchungsregionen nach unterschiedlichen Kriterien kurz beschrieben und charakterisiert.

3.4.1 Stadtstaat Singapur

Eine Untersuchungsregion, anhand derer die Integration von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktursystemen beurteilt wird, stellt der Inselstaat Singapur dar.

Geografie und Lage

Singapur liegt in Südostasien am südlichsten Punkt der Malaiischen Halbinsel und ist umgeben von seinen Nachbarländern Malaysia und Indonesien. Sowohl die Straße von Johor als auch die Straße von Singapur bilden eine natürliche Grenze gegenüber den anrainenden Staaten. Trotz der vergleichsweise geringen Landfläche von nur 718,2 km² [80] ist Singapur ein überaus städtisch geprägtes und industrialisiertes Land auf dem asiatischen Kontinent. Durch Landgewinnung und Aufschüttungen auf der Südseite der Stadt wird die Landfläche jedoch stets erweitert. In West-Ost-Richtung erstreckt sich Singapur derzeit auf etwa 45 km, während die Nord-Südausdehnung bei gut 25 km liegt. Neben der Hauptinsel umfasst Singapur eine Vielzahl von weiteren größeren und kleineren Inseln, die wie im Falle der Insel Sentosa z. B. als Naherholungsgebiet genutzt werden.

Etwa 14 % der Landfläche entfallen auf die Wohnraumnutzung, Industrie- und Gewerbeflächen weisen einen Anteil von 13 % auf. Ein weiterer beträchtlicher Teil von insgesamt 15 % wird durch Straßen, Verkehrsflächen, Hafen- und Flughafeneinrichtungen belegt. Den Rest nehmen u. a. Park-, Erholungs- oder Militärfächen ein. [81]

Bevölkerung und Siedlungsstruktur

Für das Jahr 2014 gibt [80] eine aktuelle Bevölkerungszahl für Singapur von 5,47 Mio. an. Dies entspricht einer Bevölkerungsdichte von 7.600 Einwohnern pro km² und zählt somit zu den höchsten weltweit. Die Bevölkerungsentwicklung in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 kann **Abbildung 3.13** entnommen werden.

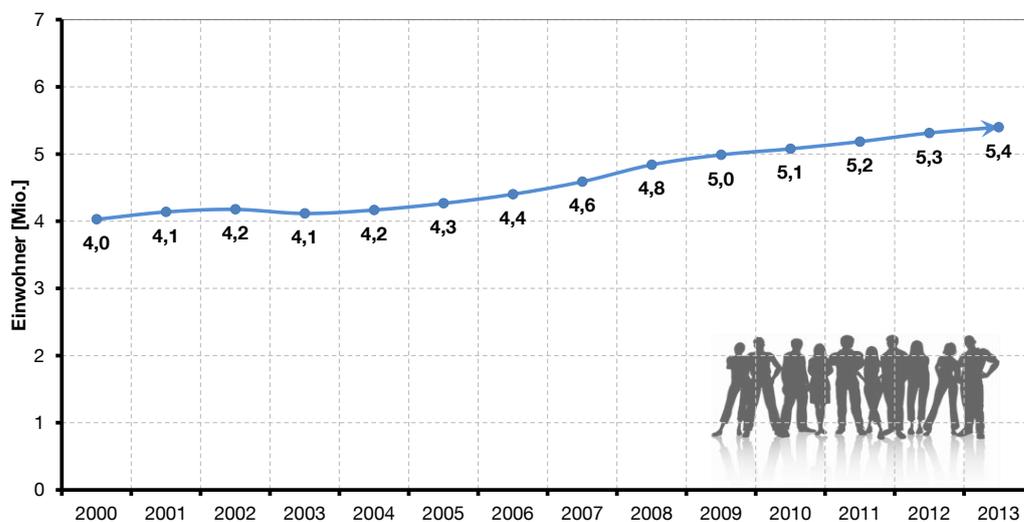


Abbildung 3.13: Bevölkerungsentwicklung in Singapur in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [82])

Es ist festzustellen, dass innerhalb des letzten Jahrzehnts des abgebildeten Betrachtungszeitraumes die Bevölkerung um bemerkenswerte 1,3 Mio. Menschen zugenommen hat. Dies unterstreicht die Attraktivität Singapurs als wichtigen Wirtschafts- und Dienstleistungsstandort in Asien. Die Bevölkerung setzt sich aus etwa 61 % Singapurischer Staatsbürger, 10 % ständigen Bewohnern und rund 29 % Gastarbeitern, Ausländern oder kurzzeitig ansässigen Einwohnern zusammen. Chinesen bilden die größte Gruppe des Vielvölkerstaates, gefolgt von Malaien, Indern und weiteren ethnischen Gruppen. [80]

Die Geburtenrate in Singapur liegt mit 1,25 Kindern pro Frau deutlich unter den Geburtenraten europäischer Länder. Auf die Singapurische Staatsbürger bezogen beträgt der Anteil der unter 20-jährigen 22 %, etwa 11 % sind über 65 Jahre alt. [80]

Gemäß den Ausführungen in den Kapiteln 3.1 und 3.2 kann Singapur mit mehr als fünf Millionen Einwohnern als Megastadt beschrieben werden, die typische Entwicklungstendenzen für derartige Strukturen zeigt.

Wirtschaft und Beschäftigungsstruktur

Als sich wirtschaftlich schnell entwickelndes Land wird Singapur zu den sogenannten Tigerstaaten in Asien gezählt. Singapurs Wirtschaft stützt sich dabei vorwiegend auf den Dienstleistungssektor sowie die verarbeitende Industrie. Die wichtigste verarbeitende Industrie ist neben der Elektronik- die Pharmaindustrie. Singapur ist zudem als international bedeutender Öl- und Raffineriestandort bekannt (z. B. auch Speicherung von Kraftstoffen). Daneben stellt insbesondere der Dienstleistungssektor als wichtigste Hauptbranche mit starken Ausprägungen in der Logistik und den Finanzen ein zentrales Standbein der singapurischen Wirtschaftsstruktur dar. [83] Neben London, New York und Hong Kong wird Singapur als bedeutungsschwerer Finanzplatz gehandelt, mit Niederlassungen weltweit agierender Bank- und Finanzunternehmen. Der Hafen in Singapur lässt dem Inselstaat zudem die Rolle als einer der größten Container-Umschlagplätze weltweit zukommen [84].

Die Beschäftigungsstruktur und die Verteilung auf die unterschiedlichen Wirtschaftszweige zeigt **Tabelle 3.2**.

Tabelle 3.2: Beschäftigte über 15 Jahren in Singapur für 2013 und 2014 (Daten: [85])

<i>Wirtschaftszweig</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2014 [%]</i>
Gesamt	2.056.100	2.103.500	100,0
Produzierendes Gewerbe	280.000	249.300	11,9
Baugewerbe	101.900	98.200	4,7
Öffentliche und private Dienstleistungen	1.647.500	1.731.200	82,3

Der Großteil der Beschäftigten mit über 82 % ist in öffentlichen und privaten Dienstleistungen tätig. Innerhalb dieses Zweiges spielen vor allem der Einzel- und Großhandel, Immobiliengeschäfte, wissenschaftliche und technische Dienstleistungen, Transport und Lagerung sowie auch verstärkt Finanz- und Versicherungsgeschäfte eine entscheidende Rolle. Das produzierende Gewerbe steht für 11,9 % der Beschäftigten. 4,7 % entfallen auf das Baugewerbe. Außerdem bleibt festzuhalten, dass in den letzten Jahren entweder ein signifikanter Rückgang der Beschäftigtenzahlen (im produzierenden Gewerbe) oder schwankende Zahlen (im Baugewerbe)

festzustellen sind. Allein der Dienstleistungssektor erfuhr in den vergangenen Jahren stets einen deutlichen Anstieg. [85]

2014 betrug das Bruttoinlandsprodukt (BIP) zu den gegenwärtigen Marktbedingungen etwa 292 Mrd. USD und lag somit 3,1 % über dem Vorjahr 2013. Dies entspricht aktuell rund 53.000 USD pro Kopf. [80]

Verkehr und Mobilität

Singapur verfügt auf der gesamten Inselfläche über ein sehr gut ausgebautes Straßen- und Autobahnnetz und ist über zwei Brücken mit Malaysia und dem asiatischen Festland verbunden. Der motorisierte Individualverkehr wird vor allem während der Hauptverkehrszeiten im innerstädtischen Bereich durch das sogenannte Electronic Road Pricing (ERP) beeinflusst und gesteuert. Dieses System soll im dicht bebauten Singapur dazu beitragen, das Verkehrsaufkommen im Central Business District (CBD) und auf den wichtigen Schnellstraßen zu minimieren sowie die Nutzung des Straßennetzes und somit die Kosten für die Verkehrsteilnehmer zu optimieren [86].

Der Besitz und die Nutzung von Pkw unterliegen in Singapur im Rahmen der konsequenten Verkehrspolitik strengen Regulierungen und werden durch das sogenannte Certificate of Entitlement (COE) geregelt. Demnach muss bei gewünschter Registrierung eines Pkw zunächst ein solches Zertifikat erworben werden. Dieses berechtigt zum Pkw-Besitz und zur Nutzung der Straßen für zehn Jahre. COE werden über Versteigerungen ausgegeben, die zweimal monatlich stattfinden. Dieses System stellt ein effektives Instrument dar, den Pkw-Bestand in Singapur zu begrenzen, kann aber die Kosten für Lizenzen auf bis zu mehrere Zehntausend SGD treiben. [87]

Mit dem Flughafen Changi im Osten der Insel und einem der geschäftigsten Häfen weltweit ist Singapur ein überaus wichtiges Drehkreuz für den internationalen und asiatischen Schiffs- und Flugverkehr. Daneben charakterisiert die Megastadt ein sehr gut ausgebautes Schnellbahn-, Bus- und Taxisystem im Nahverkehr, das vergleichsweise kostengünstig und hoch getaktet betrieben werden kann. Singapur investiert zukünftig verstärkt in weitere Infrastrukturprojekte und flächeneffiziente Verkehrssysteme. [88]

Weitere Kenngrößen für Verkehr und Mobilität sowie Ausführungen zur Energieinfrastruktur in Singapur sind Bestandteil des Kapitels 5.1.

3.4.2 Stadt Frankfurt am Main

Zur Analyse der Elektromobilitätseinbindung in städtische Strukturen wird die Stadt Frankfurt am Main als zweite Untersuchungsregion herangezogen.

Geografie und Lage

Frankfurt am Main ist die größte Stadt im Bundesland Hessen. Der Main durchfließt das Stadtgebiet und bildet eine natürliche Grenze zur angrenzenden Nachbarstadt Offenbach im Osten sowie zum Landkreis Groß-Gerau im Westen. Die Gesamtfläche beträgt mit ca. 248 km² rund ein Drittel der Landesfläche Singapurs. In Ost-West-Ausdehnung überstreicht Frankfurt eine Länge von 23,4 km, die Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 23,3 km. Frankfurt umfasst insgesamt 46 Stadtteile. [89]

Im Jahr 2013 fokussierte die Flächennutzung in Frankfurt auf die drei großen Bereiche Verkehrsflächen (20,7 %, auch bedingt durch den Frankfurter Flughafen), Gebäude- und Freiflächen (28,6 %) sowie Landwirtschaftsflächen mit 24,2 % Anteil an der Gesamtfläche. Wald-, Erholungs-, Wasser- sowie Betriebsflächen nehmen die verbleibende Fläche ein. [89]

Bevölkerung und Siedlungsstruktur

Am 30. September 2014 zählte die Stadt Frankfurt am Main 714.241 Einwohner [90]. Mit knapp 2.900 Einwohnern pro km² gehört Frankfurt somit zu den am dichtesten besiedelten Kommunen Deutschlands. **Abbildung 3.14** gibt einen Überblick über die Bevölkerungsentwicklung in der Zeitreihe von 2000 bis 2013.

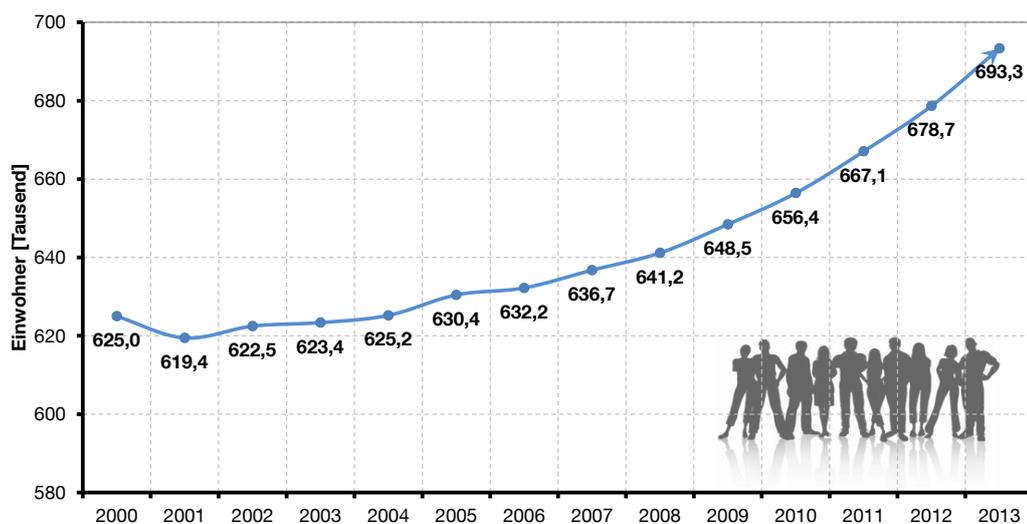


Abbildung 3.14: Bevölkerungsentwicklung in Frankfurt in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [89])

In den vergangenen 14 Jahren ist ein kontinuierliches Wachstum der Bevölkerung festzustellen. Insbesondere seit etwa 2007 sind vergleichsweise hohe Zuwachsraten in der Zeitreihe zu beobachten. Auffallend ist ferner die Tatsache, dass Frankfurt von einem hohen Anteil junger Personen unter 30 Jahren geprägt ist (32 %). Dies unterstreicht die Attraktivität der Stadt als wichtigen wirtschaftlichen Standort für Deutschland aber auch auf europäischer Ebene. 16 % der Gesamtbevölkerung sind älter als 65 Jahre. [89]

Frankfurt ist mit mehr als 100.000 Einwohnern für sich betrachtet gemäß der Einteilung nach Abbildung 3.5 als Kernstadt zu bezeichnen. Gleichzeitig ist die Stadt aber auch in die Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main eingebunden [91]. Somit kann diese Agglomeration mit Zentrum Frankfurt auch mit dem Konzept der erweiterten Stadtregion (Kapitel 3.1.3) beschrieben werden. Zudem wird sie auch als Weltstadt eingestuft [92].

Wirtschaft und Beschäftigungsstruktur

Die wirtschaftliche Situation in Frankfurt am Main entwickelt sich in den vergangenen Jahren sehr dynamisch. **Tabelle 3.3** fasst die Struktur und Aufteilung der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Frankfurt am Main für die Jahre 2012 und 2013 zusammen.

Tabelle 3.3: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Frankfurt am Main für 2012 und 2013 (Daten: [89])

<i>Wirtschaftszweig</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2013 [%]</i>
Beschäftigte am Arbeitsort	516.900	524.204	100,0
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	174	174	0,0
Produzierendes Gewerbe	56.918	56.524	10,8
Dienstleistungsbereiche	459.803	467.501	89,2
Beschäftigte am Wohnort	281.338	291.647	-
Pendlersaldo	260.681	258.998	-

Von den mehr als 520.000 Beschäftigten sind 89,2 % im Sektor der Dienstleistungen tätig. Eine weitere Differenzierung dieses Sektors macht deutlich, dass hier vor allem die Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen, die Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen sowie der Bereich Verkehr und Lagerei eine bedeutende Rolle einnehmen. Lediglich knapp 11 % der Beschäftigten entfallen auf das produzierende Gewerbe. Analog zur Situation in

Singapur geht das Wachstum im Dienstleistungssektor mit einem Rückgang der Beschäftigtenzahlen im produzierenden Gewerbe einher. [89]

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Stadt Frankfurt mit den Hauptniederlassungen der Europäischen Zentralbank und der Deutschen Bundesbank ein wichtiger Finanz-, Börsen- und Dienstleistungsstandort ist und innerhalb Deutschlands und Europa eine ähnliche Stellung innehat wie Singapur im asiatischen Raum. Daneben besitzt Frankfurt aufgrund der Stellung als Drehscheibe im Bereich Banken/Finanzen sowie auch als Verkehrsdrehscheibe Hub-Charakter.

Verkehr und Mobilität

Frankfurt ist durch die zentrale Stellung des Frankfurter Flughafens ein bedeutender Verkehrsknotenpunkt. Im internationalen Vergleich steht der Flughafen Frankfurt im Jahre 2014 auf Platz 11 unter Berücksichtigung der Passagierzahlen von 59,57 Mio. pro Jahr und auf Platz 9 im Cargo-Bereich mit 2,08 Mio. t Gütern [93]. Darüber hinaus besitzt Frankfurt am Main einen der verkehrsreichsten Personenbahnhöfe in ganz Europa.

Im Jahr 2013 waren etwa 315.000 Pkw in Frankfurt zugelassen, was zu einem Motorisierungsgrad von rund 0,45 Pkw pro Einwohner führt [89]. Durch ihre zentrale Lage in der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main ist die Stadt bestens an das deutsche Autobahnnetz angebunden. Sowohl die BAB A3 als auch die BAB A5 durchziehen als grenzüberschreitende Autobahnen den Agglomerationsraum.

Das differenzierte Mobilitätsverhalten Frankfurts sowie die Energieinfrastruktur werden im weiteren Verlauf der Arbeit in Kapitel 5.2.1 intensiver diskutiert.

3.4.3 Stadt Ingolstadt

Die Stadt Ingolstadt steht als dritte Untersuchungsregion zur Verfügung und ist im Vergleich zu Singapur und Frankfurt von einer wesentlich kleineren Bevölkerungszahl charakterisiert.

Geografie und Lage

Die oberbayerische kreisfreie Stadt Ingolstadt ist die fünftgrößte Stadt Bayerns und zählt zu den 23 Oberzentren Bayerns. Die Donau trennt das Stadtgebiet etwa mittig in einen nördlichen und einen südlichen Teil. Ingolstadt liegt im Ingolstädter Becken auf etwa 362 m ü. NN und grenzt an die Landkreise Eichstätt, Pfaffenhofen a. d. Ilm und Neuburg-Schrobenhausen. Die Fläche der Stadt beträgt mit 133 km² etwas mehr als die Hälfte der Fläche Frankfurts. Die größte Nord-Süd-Ausdehnung beträgt

ca. 15,6 km. In ost-westlicher Richtung erstreckt sich der Landkreis auf 18,2 km. Neben der eigentlichen Stadt mit ihren 12 Stadtbezirken umfasst das Stadtgebiet zudem mehrere umliegende Ortsteile. [94]

Die Landwirtschaftsfläche steht mit 43,8 % Anteil an der Gesamtfläche an erster Stelle der Flächennutzung in Ingolstadt. Gebäude- und Freiflächen nehmen 23,0 % der Gesamtfläche ein. Auf Wald- und Verkehrsflächen entfallen 13,5 % und 9,4 %, gefolgt von Wasser- und Erholungsflächen. [95]

Bevölkerung und Siedlungsstruktur

Als typische mittelgroße Stadt wies Ingolstadt am Ende des Jahres 2014 eine Bevölkerung von 129.628 auf [94]. Mit knapp 1.000 Einwohnern pro km² fällt Ingolstadt deutlich hinter der Siedlungsdichte von Frankfurt zurück. Die Stadt Ingolstadt prägt ein starkes Bevölkerungswachstum. Allein seit dem Jahr 2000 ist ein kontinuierliches und nahezu lineares Wachstum in der Einwohnerentwicklung festzustellen. Die Zeitreihenentwicklung ist in **Abbildung 3.15** abgebildet.

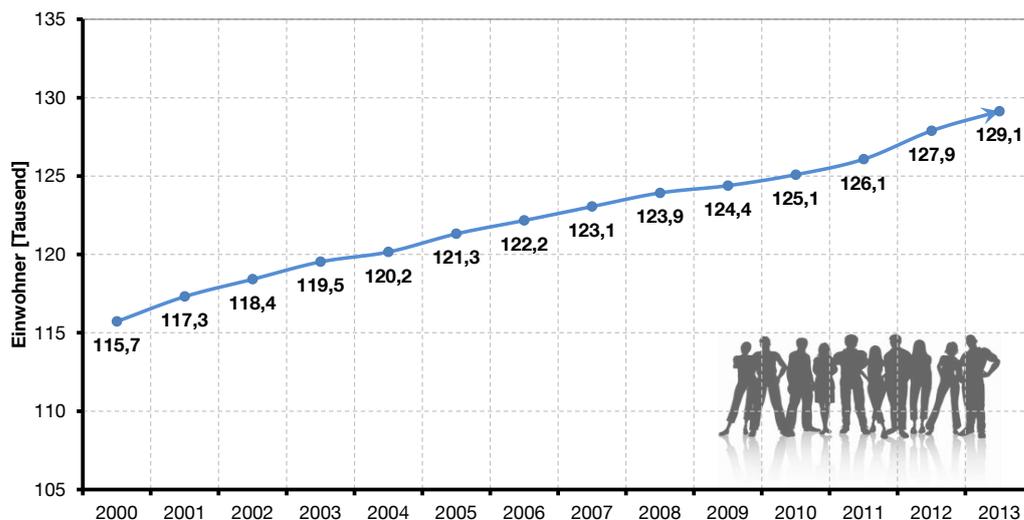


Abbildung 3.15: Bevölkerungsentwicklung in Ingolstadt in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [95, 96])

Im Jahr 1989 wurde in Ingolstadt die Einwohnerzahl von 100.000 überschritten, was der Stadt den Status einer Großstadt einbrachte. Die natürliche Bevölkerungsbewegung sowie die Wanderungen zeigen für Ingolstadt einen Überschuss. [95]

Die demografische Struktur Ingolstadts ist von einem hohen Anteil junger Menschen unter 25 Jahren charakterisiert (ca. 25 %). Der Anteil der über 65-jährigen an der Gesamtbevölkerung beträgt rund 19 %. [95]

Zum einen weist Ingolstadts Zentrum ausgeprägte städtische Strukturen auf. Zum anderen ist das Stadtgebiet von mehreren umliegenden Ortsteilen geprägt, die eher ländlichen Charakter zeigen. Die Siedlungsstruktur Ingolstadts kann also sowohl ländlich als auch städtisch charakterisiert werden und dient als Schnittstelle zwischen dem nahezu vollkommen städtischen Verkehrsverhalten in Singapur und Frankfurt und dem Verhalten auf dem Land (z. B. in der ebenfalls betrachteten Gemeinde Schöllnach). Mit mehr als 100.000 Einwohnern kann Ingolstadt als Kernstadt in verstädterten Räumen kategorisiert werden.

Wirtschaft und Beschäftigungsstruktur

Die in Ingolstadt festzustellende Verteilung der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten auf die unterschiedlichen Wirtschaftszweige kann **Tabelle 3.4** entnommen werden.

Tabelle 3.4: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Ingolstadt für 2011 und 2012 (Daten: [95])

<i>Wirtschaftszweig</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2012 [%]</i>
Beschäftigte am Arbeitsort	84.788	87.945	100,0
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	86	83	0,1
Produzierendes Gewerbe	42.811	44.109	50,2
Handel, Verkehr, Gastgewerbe	12.126	12.742	14,5
Unternehmensdienstleister	15.899	16.753	19,0
Öffentliche und private Dienstleister	13.866	14.213	16,2
Beschäftigte am Wohnort	49.435	51.395	-
Pendlersaldo	35.353	36.550	-

Ingolstadt ist stark geprägt vom produzierenden Gewerbe. Allein in diesem Wirtschaftszweig sind mehr als 50 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten tätig. Unter anderem ist dafür die große Bedeutung Ingolstadts als Standort für die Automobil- und Erdölindustrie verantwortlich. Eine nur geringe Anzahl an Beschäftigten entfällt auf den land- und forstwirtschaftlichen Zweig, während die Beschäftigungsstruktur in den verbleibenden Wirtschaftszweigen ähnlich gestaltet ist.

Ingolstadt kann als typische Einpendlerstadt bezeichnet werden. Täglich arbeiten in Ingolstadt knapp 88.000 Beschäftigte, von denen allerdings nur gut 51.400 ihren Wohnsitz dort haben. Diese Tatsache führt zu einem Pendlersaldo von etwa 36.500. Insgesamt pendeln täglich etwa 57.500 in das Stadtgebiet. Die Zielorte der 17.000

Auspendler sind dabei hauptsächlich Eichstätt (33 %), Pfaffenhofen (17 %) und München (16 %) [94].

Verkehr und Mobilität

Der Motorisierungsgrad von etwa 0,7 Pkw pro Einwohner in Ingolstadt ist aufgrund der hohen Anzahl zugelassener Pkw von knapp 90.000 im bayernweiten Vergleich ungewöhnlich hoch (auch bedingt durch die Rolle Ingolstadts als Automobilstandort). Auch auf bundesdeutscher Ebene ist der Motorisierungsgrad in Ingolstadt als überdurchschnittlich einzustufen. [94]

Durch die zentrale Lage Ingolstadts in Bayern ist der Landkreis verkehrstechnisch günstig an der BAB A9 gelegen. Zudem verfügt Ingolstadt über einen ICE-Halt.

Für das Ingolstädter Verkehrs- und Mobilitätsverhalten sowie die Bewertung der Verkehrsmittelnutzung und der Energieinfrastruktur sei auf Kapitel 5.2.2 verwiesen.

3.4.4 Marktgemeinde Schöllnach

Die vierte Untersuchungsregion in dieser Arbeit bildet der Kernort der ländlich strukturierten Marktgemeinde Schöllnach im Bayerischen Wald.

Geografie und Lage

Der Markt Schöllnach ist ein staatlich anerkannter Erholungsort und liegt auf 371 m ü. NN im Naturpark Bayerischer Wald. Neben Hengersberg, Metten und Winzer ist Schöllnach eine von vier Marktgemeinden bayerischen Gemeinderechts im niederbayerischen Landkreis Deggendorf. Der Ort wird von der kleinen Ohe durchflossen, die im späteren Verlauf in die Donau mündet. Zum Gemeindegebiet zählen neben dem Kernort Schöllnach die beiden größeren Ortschaften Taiding und Riggerding sowie weitere 59 Gemeindeteile. Das gesamte Gebiet liegt auf der Südseite des 1.016 m hohen Brotjacklriegels. [97]

Mit einer Gesamtfläche von 39,9 km² beträgt das Gemeindegebiet von Schöllnach etwa 30 % der Landkreisfläche Ingolstadts. Die maximale Nord-Süd-Ausrichtung liegt bei 8 km, in ost-westlicher Richtung sind 9 km festzustellen.

Mehr als die Hälfte der Gemeindefläche entfällt auf landwirtschaftliche Nutzung (51,9 %). Waldflächen besitzen einen Anteil von rund 38,2 % an der Gesamtfläche. Nur 5,6 % entfallen auf Gebäude- und Freiflächen, die Verkehrsflächen nehmen 3,5 % ein. [98]

Bevölkerung und Siedlungsstruktur

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Regionen Singapur, Frankfurt am Main und Ingolstadt zeigt Schöllnach hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung ein gänzlich anderes Verhalten. In **Abbildung 3.16** wird die Bevölkerungsentwicklung der Marktgemeinde in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 visualisiert.

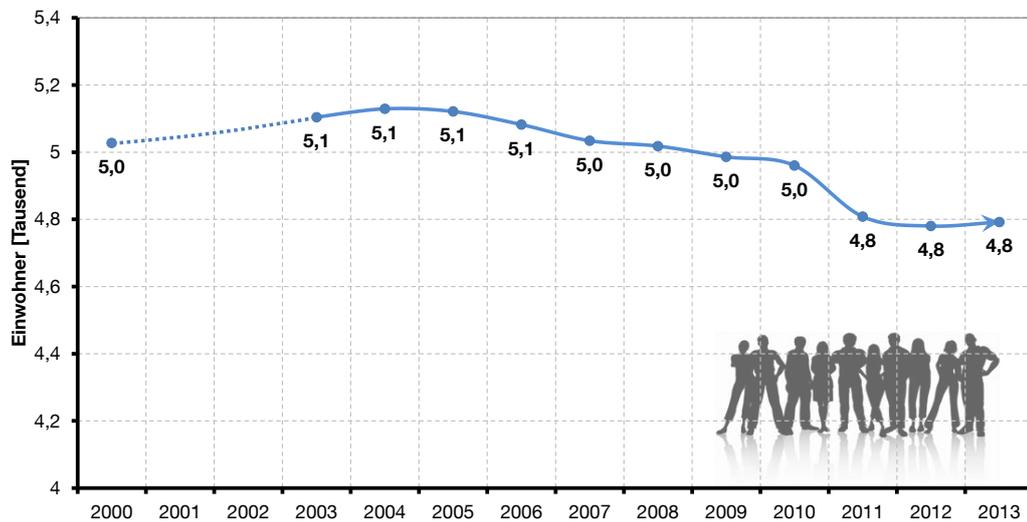


Abbildung 3.16: Bevölkerungsentwicklung in Schöllnach in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [96, 98])

Während bis zum Jahr 2005 noch von einer steigenden Bevölkerungszahl gesprochen werden konnte, ist vor allem in den letzten zehn Jahren ein negatives Einwohnerwachstum festzustellen. Derzeit leben im gesamten Gemeindegebiet etwa 4.800 Menschen. Die über das gesamte Gemeindegebiet ermittelte Bevölkerungsdichte liegt bei ca. 120 Einwohner pro km².

Die jüngere Bevölkerung unter 30 Jahren stellt einen Anteil von 33 %. Ein Anteil von knapp 17 % ist für Einwohner über 65 Jahre festzustellen. [98]

Eine vergleichsweise geringe Bevölkerungsdichte ordnet gemäß den Kriterien in Kapitel 3.2 den Landkreis Deggendorf, der die Gemeinde Schöllnach beinhaltet, den ländlichen Kreisen zu. Das Gemeindegebiet Schöllnach selbst weist nochmal eine deutlich geringere Bevölkerungsdichte auf. Zudem zeigt Schöllnach weitere typische Merkmale des ländlichen Raumes, wie sie in Kapitel 3.1.2 beschrieben sind. So ist der Ort charakterisiert durch eine dominante agrarische Nutzung, Abwanderung und Überalterung sowie eine verstärkte touristische Erschließung.

Wirtschaft und Beschäftigungsstruktur

Insgesamt betrachtet prägen die wirtschaftliche Struktur des ländlichen Schöllnachs in großer Vielfalt kleinere Gewerbe- und insbesondere Handwerksbetriebe. Dabei hat natürlich auch die Landwirtschaft eine tragende Rolle inne, obwohl diese bei der Betrachtung der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten etwas in den Hintergrund tritt.

In **Tabelle 3.5** ist die Aufteilung der Beschäftigten auf die Wirtschaftszweige für die Jahre 2011 und 2012 zusammengefasst.

Tabelle 3.5: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Schöllnach für 2011 und 2012 (Daten: [98])

Wirtschaftszweig	2011	2012	2012 [%]
Beschäftigte am Arbeitsort	1.036	1.048	100
Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	9	9	0,9
Produzierendes Gewerbe	450	485	46,3
Handel, Verkehr, Gastgewerbe	292	291	27,8
Unternehmensdienstleister	87	90	8,6
Öffentliche und private Dienstleister	187	173	16,5
Beschäftigte am Wohnort	1.818	1.829	-
Pendlersaldo	-782	-781	-

46,3 % der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Schöllnach sind im produzierenden Gewerbe tätig. Die bedeutende Rolle der Untersuchungsregion als Fremdenverkehrszentralort der „Region Sonnenwald“ im Naturpark Bayerischer Wald für den Tourismus wird durch den vergleichsweise hohen Anteil Beschäftigter im Wirtschaftszweig Handel, Verkehr und Gastgewerbe deutlich. Außerdem kann Schöllnach innerhalb des Landkreises Deggendorf als wichtiger Schulstandort betrachtet werden, der Grundschule, Mittelschule, Realschule sowie ein sonderpädagogisches Förderzentrum betreibt.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass Schöllnach im Gegensatz zu den Städten Ingolstadt und Frankfurt am Main einen deutlich negativen Pendlersaldo zu verzeichnen hat. Da die Arbeitsplatzdichte relativ gering ist, verlassen täglich knapp 800 Personen die Gemeinde, um ihrer Arbeit nachzugehen.

Verkehr und Mobilität

Das Kraftfahrt-Bundesamt gibt für die Gemeinde Schöllnach 2.928 zugelassene Pkw an [99]. Damit liegt der Motorisierungsgrad bei gut 611 Pkw pro 1.000 Einwohner. Die vergleichsweise hohe Zahl spiegelt den Stellenwert des eigenen Fahrzeuges und des motorisierten Individualverkehrs im ländlichen Raum wider.

Das untersuchte Mobilitätsverhalten sowie die Energieinfrastruktur der Gemeinde Schöllnach sind Bestandteil der Ausführungen in Kapitel 5.3.

4 Methoden und Vorgehensweise

Die Beantwortung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsfrage (Eignung der verschiedenen Untersuchungsregionen für die Integration von Elektromobilität) erfordert individuell angepasste Methodiken und Herangehensweisen. So kommen neben Raummodellen z. B. zur Bestimmung von Parkraumstrukturen auch Energiemodelle oder empirische Untersuchungen (Fragebogen) zum Einsatz.

Eine Übersicht über die in dieser Arbeit angewandten Methoden und Herangehensweisen zeigt **Abbildung 4.1**.

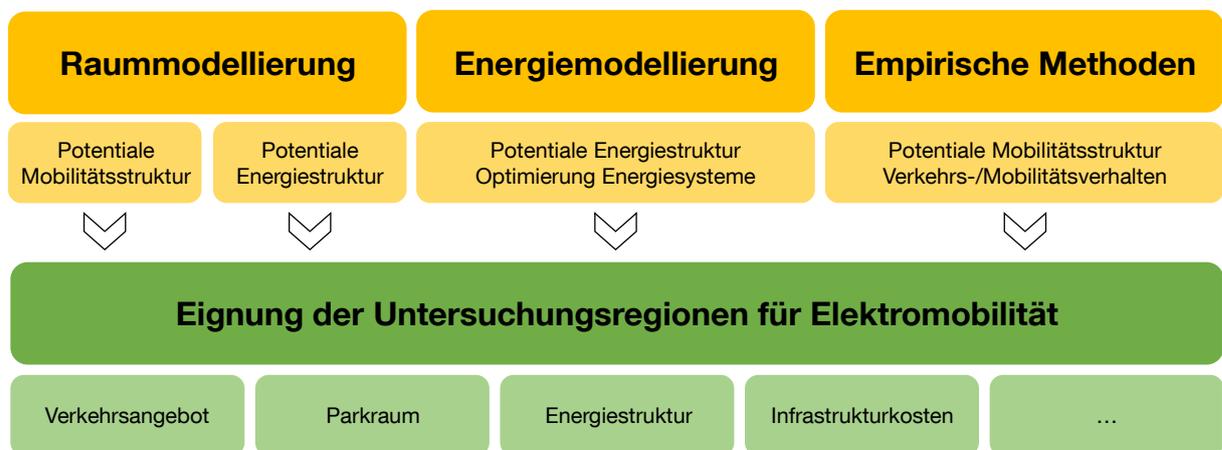


Abbildung 4.1: Übersicht über die in dieser Arbeit angewandten Methoden und Vorgehensweisen

Auf Basis der verfügbaren Daten ist es erforderlich, diese verschiedenen methodischen Vorgehensweisen zu verwenden und die in der vorliegenden Studie zu untersuchenden Aspekte aus unterschiedlichen Perspektiven zu beleuchten. Aufgrund der Berücksichtigung verschiedener Themenfelder und Aspekte (Mobilität, Energie, Kosten etc.) handelt es sich nicht um ein geschlossenes methodisches System. Dieses Kapitel beschreibt die grundlegenden Methoden, die in dieser Arbeit Verwendung finden. Die entsprechenden Daten und Annahmen werden dargestellt und erläutert.

4.1 Räumliche Modellierung

Zur Modellierung von Potentialen der Mobilitäts- und Energiestruktur kommen unter anderem räumliche Modelle zum Einsatz. Diese bauen vorwiegend auf geographischen Informationssystemen auf (GIS).

4.1.1 Mobilität

Die in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse für die Ermittlung der für Pkw zur Verfügung stehenden Stellplätze (privat) und Parkstände (öffentlich) in den jeweiligen Untersuchungsregionen basieren auf der hier beschriebenen Vorgehensweise.

Datengrundlagen

Für die Modellierung der räumlichen Parkplatz- bzw. Parkflächenstruktur in einer Region ausgehend von der Bevölkerungsverteilung sind folgende Daten für die Untersuchungsregion zugrunde zu legen:

- Gebäudegrundflächen/Gebäudegrundrisse (Polygone)
- Gebäudenutzung/Gebäudeart
- Anzahl oberirdischer Geschosse pro Gebäudepolygon
- Straßennetz der jeweiligen Untersuchungsregion
- Motorisierungsgrade für Pkw und mittlere Wohnflächen

Der Großteil dieser digitalen Geodaten konnte durch die jeweiligen Stadtverwaltungen, Landesämter (z. B. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) oder Singapore Land Authority (SLA)) oder sonstigen Einrichtungen zur Verfügung gestellt werden. Für kleinere Regionen mit einer beschränkten Anzahl an Gebäuden (z. B. in der Untersuchungsregion Schöllnach) ist es zudem möglich, die notwendigen Informationen aus Luftbildern und weiteren Landkarten abzuleiten und in Geoinformationssysteme zu überführen. Nicht sämtliche Datensätze enthalten jedoch alle notwendigen Informationen und Attribute in der gewünschten Auflösung, sodass diese erst nach einer umfangreichen Aufbereitung einzelner Merkmale (z. B. Ermittlung der Anzahl oberirdischer Geschosse) weiterverwendet werden konnten.

Modellierung in Geografischen Informationssystemen

Die Abschätzung der räumlich hoch aufgelösten Parkplatz- und Parkflächenstruktur folgt der Modellierungsmethodik aus **Abbildung 4.2**, deren einzelnen Schritte unten folgend beschrieben werden.

Identifizierung der Bevölkerungsstruktur der Untersuchungsregion: Zur Identifizierung der Bevölkerungsstruktur wird im ersten Schritt von einer Gebäudedatenbank ausgegangen, die sämtliche bereitgestellten digitalen Geodaten und deren beschreibende Attribute enthält. Diese Daten umfassen Lage, Geometrie, Art der Nutzung sowie Anzahl der oberirdischen Geschosse des Gebäudes. Weitere Daten z. B. zum Gebäudealter sind vorhanden. Polygone, deren Attribute nicht vollständig er-

fasst sind (z. B. fehlende Geschossanzahl), werden entsprechend vervollständigt. Dies geschieht über Abschätzungen und Näherungen beispielsweise durch regions-spezifische Mittelwerte.

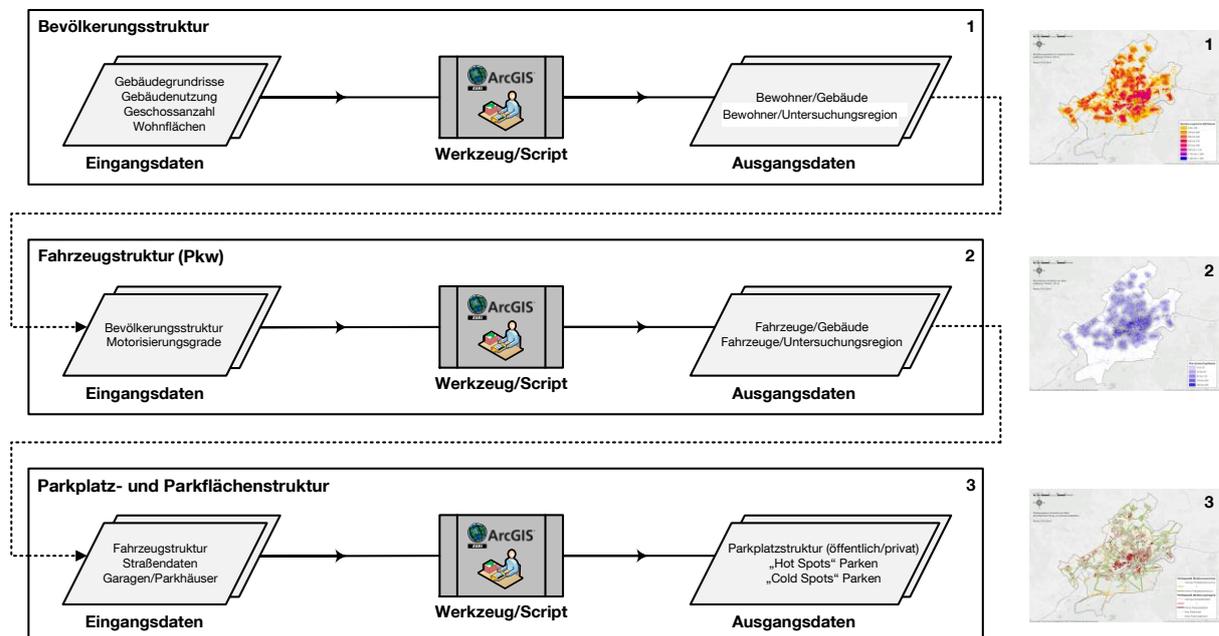


Abbildung 4.2: Modellierungsmethodik im geografischen Informationssystem zur Ermittlung der Parkplatz- und Parkflächenstruktur in den Untersuchungsregionen

Ausgehend von dieser Datenbasis erfolgt eine Selektion aller Wohngebäude, Gebäude mit Mischnutzung und weiterer Gebäude, die zur Ermittlung der Einwohnerzahl in der Untersuchungsregion relevant sind. Die Berechnung der Energiebezugsfläche bzw. Gesamtwohnfläche eines Gebäudes kann unter Anwendung von Gleichung (4.1) aus [100] durchgeführt werden:

$$\text{Gesamtwohnfläche} = \text{Gebäudegrundfläche} \cdot \text{Geschossanzahl} \cdot 0,8 \quad (4.1)$$

Da eine Bewertung der Wohnfläche für Nicht-Wohngebäude und insbesondere für Gebäude aus dem Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) mit Mischnutzung sich deutlich komplexer gestaltet und von vielerlei Faktoren wie Nutzungsart, Art des Betriebes usw. abhängig ist [100], wird zur Bestimmung der Gesamtwohnfläche dieser Gebäude eine pauschale Wohnnutzung von durchschnittlich 20 % angenommen.

Bevölkerungsdichten hängen häufig von der Lage des Viertels innerhalb eines Stadtgebietes ab. Um den lageabhängigen Einfluss nachzubilden, werden zur Bestimmung der Bewohner pro Gebäude und somit zur Verteilung der gesamten Be-

völkerung stadtteilscharfe Daten für mittlere Wohnflächen pro Einwohner genutzt (**Abbildung 4.3**, links).

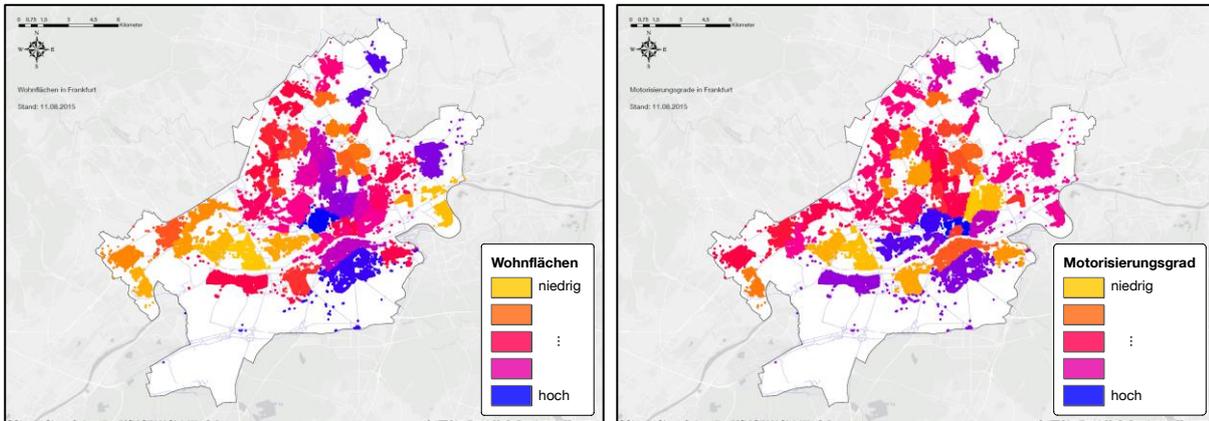


Abbildung 4.3: Beispielhafte Verteilung der lageabhängigen mittleren Wohnflächen pro Einwohner (links) sowie der lageabhängigen Motorisierungsgrade für Pkw (rechts) (Daten: [89])

Eine Bewertung der ermittelten Gesamtwohnfläche für jedes Gebäude mit durchschnittlichen Wohnflächen pro Einwohner liefert schließlich die gewünschten gebäudescharfen Bevölkerungsinformationen. Diese Daten werden zur einfacheren Visualisierung einer Rasterung unterzogen.

Identifizierung der Fahrzeugstruktur (Pkw) der Untersuchungsregion: Die gebäudescharfe Bevölkerungsverteilung innerhalb eines Untersuchungsgebietes kann nun als Basis für die Identifizierung der Fahrzeug- bzw. Pkw-Struktur zugrunde gelegt werden. Dafür sind neben der Kenntnis der Bevölkerungsstruktur Informationen zum Motorisierungsgrad für Pkw notwendig, der ebenfalls lage- bzw. stadtteilabhängig definiert werden kann (Abbildung 4.3, rechts). Die Berechnung der pro Gebäude theoretisch anfallenden Pkw erfolgt durch Multiplikation des Motorisierungsgrades mit der aus der Bevölkerungsanalyse erhaltenen Einwohnerzahl. Auch hier erfolgt abschließend eine Clusterung der Ergebnisse.

Aufbereitung des Straßennetzes der Untersuchungsregion: Nachdem Bevölkerungs- und Pkw-Struktur bekannt sind, sind zur Abschätzung der öffentlichen sowie der privaten Parkplatz- und Parkflächenstruktur einer Region weitere Eingangsdaten notwendig. Zusätzlich zur Kenntnis des Typs des Parkgebäudes (Einzel-, Doppel-, Tiefgarage usw.) sind zur Bestimmung von Parkständen auf der Straße Informationen zum Straßennetz essentiell.

Die Straßendaten für die Untersuchungsregionen werden von OpenStreetMap bezogen und bilden die Analysegrundlage. Zunächst sind die Straßendaten aufzubereiten

und diejenigen Straßenkategorien zu identifizieren, die grundsätzlich für das Parken zulässig sind. Dazu zählen beispielsweise Wohnstraßen, Hauptstraßen, Durchgangsstraßen und Anliegerstraßen. Zufahrtswege und Verbindungsstraßen bleiben unberücksichtigt. Für die ausgewählten Straßen wird angenommen, dass diese beidseitig beparkbar sind und lediglich Längsaufstellung der Pkw parallel zur Straße erlauben. Darüber hinaus wird auf sämtlichen Straßen eine ausreichende Breite für beidseitiges Parken vorausgesetzt. Nach der Bereinigung der Daten zum Straßennetz aus OpenStreetMap und Transformation des Straßennetzes in geeignete Linienelemente, sind die maximal pro Straßensegment bereitstehenden Parkstände sowie die maximal aufzunehmenden Pkw basierend auf der Gebäudestruktur zu bestimmen.

Der Platzbedarf bzw. Streckenverbrauch pro Pkw im ruhenden Verkehr (parkend) wird mit 7,5 m abgeschätzt. Darin enthalten sind 25 % Längenzuschlag, um etwaigen Kreuzungsbereichen, Auffahrten, Ausfahrten oder Parkverboten entlang Straßen (über die keine Informationen bekannt sind) Rechnung zu tragen. Die Ermittlung der pro Straßensegment zur Verfügung stehenden Parkmöglichkeiten erfolgt durch Division der Länge des Segments durch den Streckenverbrauch eines Pkw und anschließender Multiplikation mit dem Faktor zwei (für beidseitiges Parken).

In einem weiteren Schritt ist zu bestimmen, welche Anzahl an Pkw ein Straßensegment im Extremfall theoretisch aufzunehmen hat. Die Zuordnung der Pkw auf das jeweilige Straßensegment basiert auf der zuvor ermittelten gebäudescharfen Pkw-Dichte, indem die Anzahl an Pkw jedes Gebäudes der jeweils nächsten Straßenkante zugeordnet wird.

Identifizierung der Parkplatz- und Parkflächenstruktur in der Untersuchungsregion: Im abschließenden Schritt kann für jede Region die private und öffentliche Parkraumstruktur abgeschätzt und dargestellt werden. Die Ermittlung und Bewertung der Anzahl an Parkständen auf öffentlichen Straßen kann unter Vernachlässigung oder Berücksichtigung von Stellplätzen in Einzel- und Doppelgaragen oder großen Parkplätzen und Tiefgaragen erfolgen.

Während die Anzahl der Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen über die Attribute der Gebäudenutzung und des Gebäudetyps vergleichsweise einfach ermittelt werden kann, fußt die Ermittlung von Stellplätzen in größeren Parkgebäuden auf einer Abschätzung. Ausgehend von den digitalen Geodaten werden dazu die Grundfläche der Parkgebäude, die Anzahl der Geschosse, der Anteil der beparkbaren Fläche an der Gesamtgebäudefläche sowie die durchschnittliche Größe eines Pkw-Stellplatzes

herangezogen. Dies ermöglicht die Ermittlung der maximalen Anzahl an Stellplätzen. Die durch den Einfluss von Einzelgaragen und großen Parkgaragen zusätzlich entstehenden Stellplätze werden wiederum auf die Straßensegmente übertragen und reduzieren so pro Straßensegment die maximal aufzunehmende Anzahl an Pkw. Es wird angenommen, dass das Einzugsgebiet der jeweiligen Tiefgaragen und großen Parkplätze und somit der zusätzlich geschaffenen Stellplätze sich auf das jeweilige Stadtviertel beschränkt. Ein Vergleich der maximalen Belegung eines Straßensegmentes mit der Soll-Belegung gibt Aufschluss über potentielle Engpässe bei der Unterbringung von Fahrzeugen auf der Straße. Diese Überlegungen beziehen sich jedoch auf den Fall, dass alle ermittelten Fahrzeuge zur gleichen Zeit geparkt werden (statischer Fall). Die zeitliche Dimension findet keine Berücksichtigung.

Der beschriebene Modellierungsansatz erlaubt es, die Anzahl der Parkstände und Stellplätze in privaten Garagen und öffentlichen Tiefgaragen oder Parkplätzen in einfacher Weise für eine Region abzuschätzen. Gleichzeitig kann damit die theoretische Anzahl an zur Verfügung stehenden Parkständen entlang öffentlicher Straßen sowie der Einfluss von Garagenstellplätzen auf das Straßenparken untersucht werden. Alle Überlegungen sind auf die räumliche Dimension beschränkt und enthalten keine zeitliche Auflösung. Die Methodik ist aufgrund der Datenlage nicht für jedes betrachtete Untersuchungsgebiet möglich oder sinnvoll anzuwenden. So wird lediglich für die Fallbeispiele Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach derart verfahren. Für Singapur werden ähnliche GIS-basierte Methoden angewandt, um die Struktur des Parkens zu analysieren.

Zusätzlich zu oben beschriebenen räumlichen Auswertungen sind zur Beurteilung der Parkraumstruktur im ländlichen Raum (Untersuchungsregion Schöllnach) Objektzählungen parkender Pkw durchgeführt worden. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich auf 14 Tage, wobei eine Zählung der Fahrzeuge im ruhenden Verkehr zu jeweils vier Zeitpunkten eines Tages (08:00, 12:00, 16:00 und 20:00 Uhr) stattfand.

4.1.2 Energie

Mithilfe räumlicher Modelle können ferner Energiepotentiale ermittelt und dargestellt werden. Die Modellierung von (erneuerbaren) Energieträgern und deren Potentiale erlaubt die Ableitung von Aussagen zu Energieinfrastrukturen und potentieller Energiebereitstellung für Elektrofahrzeuge in einer Untersuchungsregion.

In [101] sind Methodiken entwickelt worden, um aufbauend auf digitalen Geodaten für eine Untersuchungsregion Potentialanalysen erneuerbarer Energien durchführen

zu können. Eine Übersicht über die Modellierung zeigt **Abbildung 4.4**. Die einzelnen Methodiken sollen an dieser Stelle kurz zusammengefasst und erläutert werden.

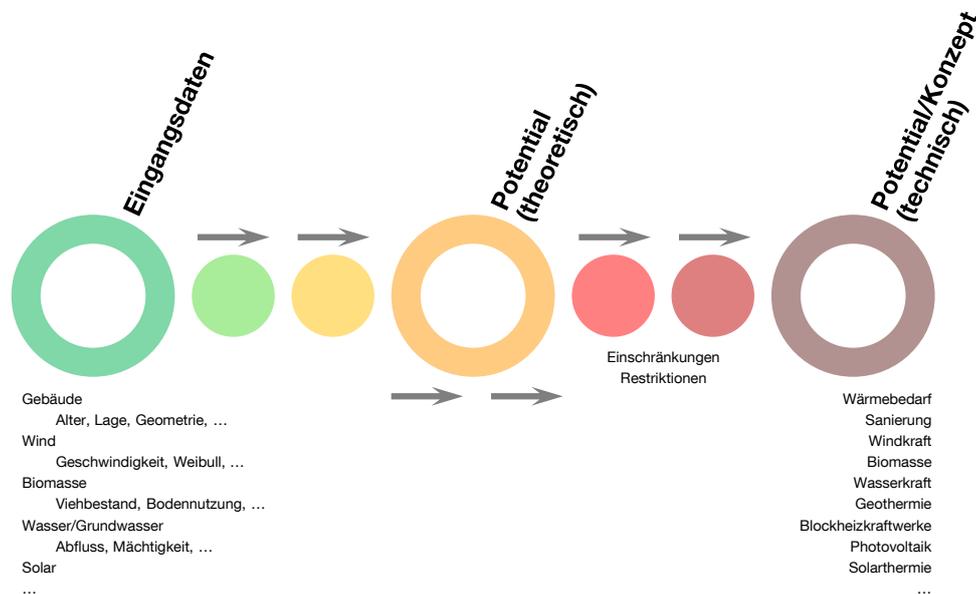


Abbildung 4.4: Modellierung von Energiepotentialen im Rahmen der Erstellung eines Energienutzungsplanes

Berücksichtigung finden die Potentiale für Wind, Biomasse, Wasser und Geothermie. In einem weiteren Schritt wird in verschiedenen Konzepten erarbeitet, wie die zukünftige Energieversorgung einer Untersuchungsregion (z. B. einer Stadt) gestaltet und der Strom- und Wärmebedarf der Gebäude idealerweise gedeckt werden könnte.

Zur Beurteilung der zukünftigen Energieversorgung auf räumlicher Basis sind zahlreiche Eingangsdaten hauptsächlich in Form von digitalen Geodaten notwendig. Hier wird zunächst erneut von einer Gebäudedatenbank ausgegangen, die Informationen zu Lage, Geometrie, Nutzungsart und Gebäudealter enthält. Diese Daten erlauben eine Abschätzung des Wärmebedarfs für Heizwärme und Brauchwarmwasser, indem zusätzlich spezifische Bedarfswerte in Abhängigkeit von Baualter und Nutzungsart des Gebäudes herangezogen werden. Dieser verortete Wärmebedarf ist Grundlage zur Ermittlung von Potentialen und Erstellung von Konzepten.

Um das Windkraftpotential zu erhalten, spielen in der Hauptsache die mittleren jährlichen Weibull-Parameter eine entscheidende Rolle. Diese dienen als Eingangsdaten, werden mithilfe eines entwickelten Werkzeuges weiterverarbeitet und liefern unter Einbeziehung von räumlichen Restriktionen schließlich ein räumlich aufgelöstes theoretisches Potential. Die Ermittlung des Biomassepotentials schließt Daten

landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Biomasse ein. Zudem wird der Anteil von biogenen Abfallstoffen am Biomassepotential bestimmt. Zur Bestimmung des Geothermiepotentials sind geothermische Ergiebigkeiten, Grundwasserdurchlässigkeiten sowie Grundwassermächtigkeiten zu berücksichtigen. Dies ermöglicht zusammen mit der geografischen Verteilung von Gebäuden in der Untersuchungsregion die Ermittlung des theoretischen Einsatzes von Grundwasserwärmepumpen bzw. deren Eignung. Daten zur Solarstrahlung auf Bauteilflächen und Einbeziehung der Nah- und Fernverschattung resultieren in der Bestimmung des Photovoltaik- (PV) und Solarthermiepotentials. Die entwickelten Methodiken lassen es zusätzlich zu, Gebäude auf Ihre Eignung für BHKW-Anlagen hin zu untersuchen.

Für detailliertere Informationen und weitere Details zur Modellierungsmethodik sei auf den veröffentlichten Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt verwiesen [101].

4.2 Energetische Modellierung

Neben Raummodellen, z. B. für Untersuchungen zur Mobilität, sind Energiemodelle Bestandteil dieser Arbeit. Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften des verwendeten Energiesystemmodells TIMES dargestellt. Die Optimierung des Energiesystems für Singapur greift auf den Modellgenerator TIMES zurück.

4.2.1 TIMES: Allgemeine Modellstruktur

TIMES steht als Akronym für „The Integrated MARKAL-EFOM System“ und wurde vom Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) innerhalb der Internationalen Energieagentur (IEA) entwickelt. Dieses Werkzeug arbeitet als wirtschaftlicher Modellgenerator für lokale, nationale oder multi-regionale Energiesysteme und erlaubt somit die Abschätzung von Dynamiken des Energiesystems über einen langfristigen, multiperiodischen Zeithorizont. Neben der Analyse eines vollständigen Energiesystems einer Region können bestimmte Sektoren im Detail betrachtet und analysiert werden (z. B. Elektrizitätssektor oder Verkehrssektor). Dabei können auch unter Berücksichtigung von Emissionen Aspekte untersucht werden, die die Grenze des reinen Energiesystems überschreiten. [102, 103]

Um das Energiesystem einer Kostenoptimierung (Angebot von Energiedienstleistungen zu minimalen globalen Kosten) zu unterziehen, ist die Prädiktion für Bedarfe von Energiedienstleistungen wesentlich. Beispiele hierfür sind Personenkilometer oder der Strombedarf für die Klimatisierung von Gebäuden. Zudem sind Daten zu existierenden und zukünftigen Technologien in jedem Sektor sowie Daten von gegenwärtig

genutzten und zukünftigen Quellen und Potentialen für die Primärenergieversorgung jeder modellierten Region zur Verfügung zu stellen. Bei der Minimierung der Gesamtkosten werden gleichzeitig Entscheidungen zu Anlageninvestitionen, zum Einsatz von Primärenergieträgern und zum Energiehandel getroffen. [102, 103]

TIMES kombiniert die Vorzüge der zwei Bottom-up-Energiesystemmodelle MARKAL und EFOM und stellt zusätzlich verschiedene neue Funktionen bereit. MARKAL trägt das Konzept des sogenannten Referenzenergiesystems (RES) sowie die Gleichgewichtseigenschaften bei. Bei der Nutzung von TIMES sind Preise, (Energie-)Mengen, Versorgung und Bedarf im Gleichgewicht. Zusätzlich wird in TIMES die detaillierte Modellierung von Energieflüssen auf Technologieebene vom Energiesystemmodell EFOM übernommen. [102, 103]

Zur Definition von Szenarien in TIMES sind verschiedene Eingangsparameter notwendig: Energiebedarfe bzw. Nachfragen, Potentiale von Primärenergiequellen, politische Rahmenbedingungen sowie technische und wirtschaftliche Parameter. Nachfragekurven werden erzeugt, indem passende Treiber für den Bedarf in unterschiedlichen Regionen identifiziert werden. Beispiele hierfür sind das Bevölkerungswachstum oder das Bruttoinlandsprodukt. Die Werte für diese Treiber für die entsprechende Untersuchungsregion sind von externen Quellen und Modellen abzuleiten. Neben dem Bedarf sind Angebotskurven von Primärenergiequellen und Gütern eine notwendige Komponente für die Erstellung von Szenarien. Diese Kurven können beispielsweise in Form von Stufen zur Verfügung stehen, die das Potential einer Ressource zu bestimmten Kosten repräsentieren. Auf der anderen Seite können Angebotskurven aber auch als aggregiertes Potential für den untersuchten Zeithorizont oder als jährliches Potential modelliert werden. Um den Ausstoß von Schadstoffen oder Emissionssteuern und Emissionsrestriktionen zu berücksichtigen und beurteilen zu können, sind politische Rahmenbedingungen als wesentlicher Teil in die Definition von Szenarien in TIMES aufzunehmen. So könnten beispielsweise bestimmte politische Bedingungen den Ausbau von Kernkraft limitieren und die Elektrizitätserzeugung durch Photovoltaik begünstigen. Zu guter Letzt bedarf die Entwicklung von Szenarien in TIMES technischer Parameter für die Transformation von Ressourcen der Primärenergie in entsprechende Energiedienstleistungen. Dies kann durch die Modellierung von Technologien und Prozessen (z. B. Kraftwerke, Raffinieren), die Güter in andere Güter überführen (Emissionen, Kraftstoffe etc.), erreicht werden. Für die Optimierung kann das Energiesystemmodell zwischen den verfügbaren modellierten Technologien wählen, wobei einzelne für die Optimierung zwin-

gend berücksichtigt werden müssen. Ziel der Optimierung ist der wirtschaftliche Einsatz von Technologien innerhalb des betrachteten Modellhorizonts. [102, 103]

TIMES verwendet zum Aufbau eines Energiesystems drei verschiedene Objekttypen. Das Energiesystem einer Region kann somit auf ein Netzwerk reduziert werden, das aus folgenden Elementen besteht [102, 103]:

- Prozesse (Technologien) transformieren Güter in andere Güter. Beispiele für Prozesse sind Abbau- oder Importprozesse für Primärenergiequellen, Kraftwerke oder Raffinerien, die Elektrizität oder Kraftstoffe für endenergiekonsumierende Elemente wie Haushalte oder Fahrzeuge produzieren.
- Güter umfassen Energieträger, Materialien, Energiedienstleistungen und Emissionen. Güter werden von Prozessen produziert und wiederum von anderen Prozessen konsumiert.
- Güterströme verbinden Prozesse und Güter. Sie sind bestimmten Prozessen zugeordnet und repräsentieren Eingangs- und Ausgangsgrößen dieser Prozesse.

Die Beziehung dieser Elemente zueinander kann in einem Netzwerkdiagramm, dem Referenzenergiesystem, deutlich gemacht werden. Einzelne Prozesse werden als Blöcke dargestellt, während Güter durch vertikale Linien repräsentiert werden. Güterströme verbinden als horizontale Linien Prozesse (Blöcke) und Güter (vertikale Linien) miteinander. [102, 103]

Ein Ausschnitt eines einfachen Referenzenergiesystems ist in **Abbildung 4.5** dargestellt.

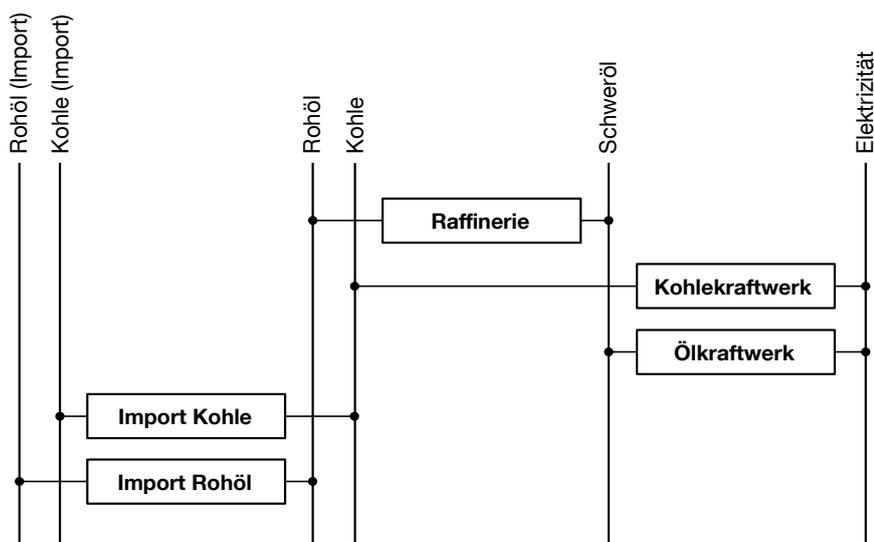


Abbildung 4.5: Ausschnitt eines einfachen Netzwerkdiagramms bzw. Referenzenergiesystems

Nach dem Import von Rohöl und Kohle werden beide Güter in Prozessen weiterverarbeitet. Kohle wird durch den Einsatz in einem Kohlekraftwerk in Elektrizität umgewandelt, Rohöl wird zunächst in einer Raffinerie veredelt und anschließend ebenfalls einem Kraftwerk zur Stromerzeugung zugeführt.

Nach Festlegung der Eingangsdaten und Generierung des Modells (Referenzenergiesystem) durch den Modellgenerator TIMES erfolgt die Optimierung des Energiesystems durch lineare Optimierung unter GAMS (General Algebraic Modeling System).

Folgende Zielfunktion (Gleichung (4.1)), die aus mehreren Kostenelementen besteht, ist dazu zu minimieren [103]:

$$\text{NPV} = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in \text{YEARS}} (1 + d_{r,y})^{\text{REFYR}-y} \cdot \text{ANNCOST}(r,y) \quad (4.1)$$

NPV (Net Present Value) ist hierbei der Kapitalwert der Gesamtkosten für alle Regionen (TIMES Zielfunktion). Die jährlichen Gesamtkosten (Investitionskosten, Fixkosten, variable Kosten, Steuern usw.) für die Region r im Jahr y werden durch den Term $\text{ANNCOST}(r,y)$ ausgedrückt, während $d_{r,y}$ für die Diskontrate steht. REFYR bezeichnet das Referenzjahr für die Diskontierung. Die jährlichen Gesamtkosten werden summiert über alle Jahre des modellierten Betrachtungszeitraumes YEARS und alle modellierten Regionen R .

Weiterführende Informationen und detaillierte Ausführungen zur Modellstruktur sind in [102–104] enthalten.

4.2.2 Modell „TIMES Singapore“

Zur Untersuchung der Energieinfrastruktur in Singapur und der Auswirkungen der Integration von verschiedenen Typen von Elektrofahrzeugen auf das Energiesystem wurde auf Basis von TIMES und GAMS ein Energiesystemmodell für Singapur entwickelt.

Abbildung 4.6 zeigt das für Singapur entwickelte Referenzenergiesystem. Die Auflösung dieses Netzwerksdiagramms ist aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur Schaffung eines besseren Überblicks über das Gesamtmodell vergleichsweise grob gewählt.

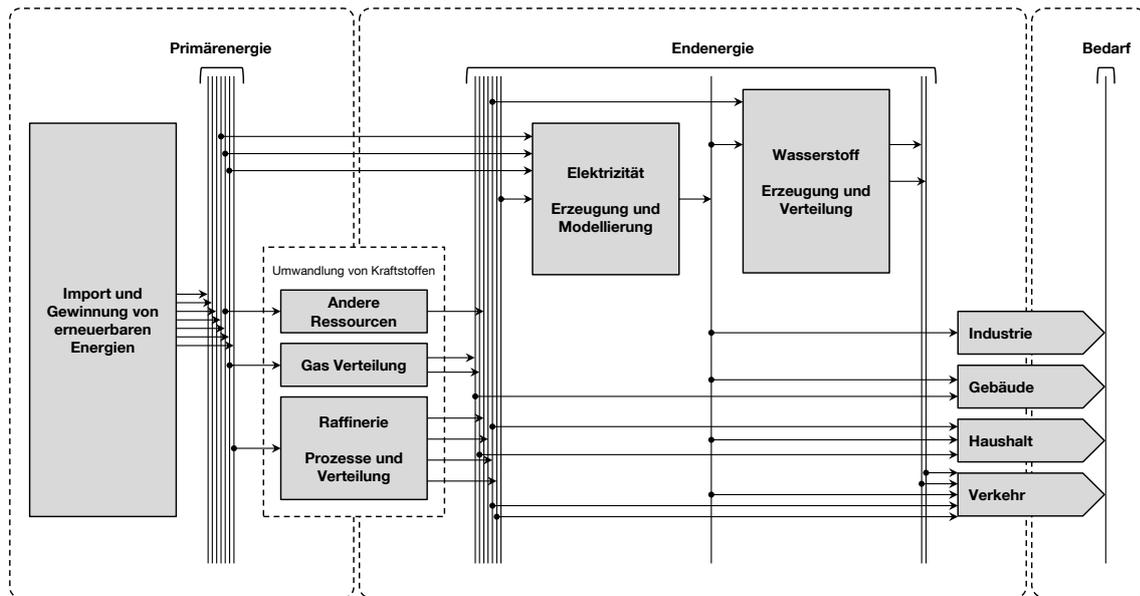


Abbildung 4.6: Referenzenergiesystem für Singapur

Die dargestellten Blöcke symbolisieren aggregierte Prozesse, während Primärenergie-, Endenergie- und Nachfragegüter durch vertikale Linien gekennzeichnet sind. Insgesamt berücksichtigt das Modell „TIMES Singapore“ vier verschiedene Sektoren, die durch einen definierten Endenergiebedarf charakterisiert und aufwendig modelliert sind. Dazu zählen die Sektoren Industrie, Gebäude (hier z. B. Bürogebäude und Einkaufszentren), Haushalte sowie Verkehr. Die Energieträger, die für die Deckung des Endenergiebedarfs sorgen müssen, sind durch zusätzliche Prozesse und Technologien bereitzustellen. Dies geschieht beispielsweise durch Erzeugungsprozesse (Gaskraftwerk, Ölkraftwerk, Raffinerie) und Verteilungsprozesse für Elektrizität oder Kraftstoffe. Um die Endenergie für nachfolgende Prozesse verfügbar zu machen, sind Import- und Gewinnungsprozesse für Energieträger notwendig (Primärenergie).

Die in Kapitel 5.1.2 dargestellten Ergebnisse sind aus dem entwickelten TIMES-Modell für Singapur abgeleitet. Nach einer Kostenoptimierung des gesamten Energiesystems stehen für jeden einzelnen modellierten Prozess die Resultate zur Verfügung. Diese umfassen Informationen für Preise, zu installierende Kapazitäten, Emissionen, Energieströme etc. Darüber hinaus können mithilfe der ermittelten Ergebnisse weitere Aspekte des singapurischen Energiesystems berechnet werden.

Der Betrachtungshorizont des Modells deckt den Zeitraum bis zum Jahr 2059 ab. Die Ergebnisse werden für die Modelljahre 2000, 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050 angegeben. Diese Struktur für den Modellzeitraum wurde gewählt, um einerseits eine Validierung mit existierenden, historischen Daten vornehmen zu können und

andererseits auf Prädiktionen für mögliche zukünftige Entwicklungen im Energiesystem von Singapur zurückgreifen zu können. Das Modell endet an den Landesgrenzen des Inselstaates Singapur.

Wie im späteren Verlauf (bei der Diskussion der Integration von Elektrofahrzeugen in das Singapur Energiesystem) detaillierter dargestellt, arbeitet das Energiesystemmodell für Singapur mit unterschiedlichen Szenarien. So werden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Prognosen sowie zur Ermittlung der Einflüsse unterschiedlicher Kraftwerke und Antriebstechnologien auf das Energiesystem Variationen der Zusammensetzung des Kraftwerks- und Verkehrssektors vorgenommen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.1.2 erläutert.

Für weitere Details zum entwickelten Modell für Singapur sei auf die dazu veröffentlichten Artikel [105–107] verwiesen.

4.2.3 Modell „TIMES Ingolstadt“

Neben dem für die Megastadt Singapur entwickelten Modell ist in [108] ein TIMES-Modell für die Stadt Ingolstadt zur Untersuchung des Potentials regenerativer Energien auf dem Stadtgebiet erstellt worden. Im Gegensatz zum Modell für Singapur, das ein abgeschlossenes System (Landesgrenzen) betrachtet, ist dieses Modell offen und basiert auf dem Bezugssystem Deutschland. Ergebnisse daraus können zur Beurteilung der zukünftigen Energieinfrastruktur der Stadt Ingolstadt abgeleitet werden.

Mit unterschiedlichen Szenarien versucht das Modell, mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems von Ingolstadt zu beschreiben und zu evaluieren. Dies geschieht sowohl in Basisszenarien (wahrscheinlichste Entwicklungen) als auch in Szenarien einer potentiellen Energieautarkie der betrachteten Stadt. Die Ergebnisse liefern Aussagen zu zukünftigen Energieimporten, Strom- und Heizwärmeversorgungsstrukturen, zur Biomassenutzung und der Integration von Elektrofahrzeugen. [108]

4.3 Mobilitätsbefragung

Im Rahmen einer Befragung ist das Mobilitätsverhalten der Gemeinde Schöllnach untersucht worden. Die gewonnenen Ergebnisse sind als wertvolle Ergänzung für den Vergleich zwischen städtischem und ländlichem Verhalten zu betrachten. Die Gemeinde Schöllnach wurde aufgrund ihrer Verschiedenartigkeit zu den Räumen Singapur, Frankfurt am Main und Ingolstadt als ländlich geprägter Untersuchungsraum ausgewählt. Die spätere Analyse basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen

der im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit der Gemeinde Schöllnach durchgeführten empirischen Untersuchung (Fragebogen) im Dezember 2014 und Januar 2015.

In Kapitel 3.4.4 ist der Untersuchungsraum bereits hinsichtlich Geografie und Lage, Bevölkerung und Siedlungsstruktur, Wirtschaft und Beschäftigung sowie Verkehrsinfrastruktur beschrieben.

4.3.1 Grundgesamtheit und Stichprobe

Die Grundgesamtheit der Befragung stellt die gesamte Bevölkerung der Marktgemeinde Schöllnach ab sechs Jahren mit Wohnsitz im Untersuchungsgebiet dar. Dabei ist es unerheblich, ob eine Person z. B. keinen Führerschein oder keinen Pkw besitzt, da die Ermittlung der Gesamtmobilität im Vordergrund steht. Insgesamt ergibt sich demnach für die Grundgesamtheit ein Wert in Höhe von ca. 4.550 Personen. Theoretisch kann die Grundgesamtheit durch Personen mit Zweitwohnsitz im Untersuchungsgebiet etwas höher ausfallen.

Zum Zwecke der empirischen Datenerhebung wurde ein Fragebogen erstellt. Aufgrund der besseren Erreichbarkeit der Gesamtbevölkerung und mit Hinblick auf die Tatsache, dass die Nutzung des Internets in manchen Bevölkerungsgruppen weniger stark verbreitet ist, ist auf eine internetbasierte Bearbeitung des Fragebogens verzichtet und stattdessen das Verfahren der Postwurfsendung mit Papierfragebogen angewandt worden. Die Bevölkerung wurde darüber hinaus durch Anzeigen im monatlich erscheinenden Mitteilungsblatt der Gemeinde sowie durch Informationen in Bürgerversammlungen über das Vorhaben in Kenntnis gesetzt und zur Teilnahme motiviert.

Insgesamt wurden 2.100 Postwurfsendungen im Gemeindegebiet mit der Aussendungsvariante „alle Haushalte“ verteilt. Jeder Haushalt erhielt einen Fragebogen, hatte jedoch die Möglichkeit, über die Webseite der Gemeinde weitere Fragebögen für Haushaltsmitglieder zu beziehen. Davon wurde jedoch nur sehr sporadisch Gebrauch gemacht. Sogenannte Werbeverweigerer (mit entsprechendem Hinweis auf dem Briefkasten) wurden durch dieses Verfahren von der Teilnahme an der Befragung ausgeschlossen. Die Sendung enthielt den im Anhang dargestellten Fragebogen sowie einen mit dem Frankiervermerk „Porto zahlt Empfänger“ bedruckten Rückantwortumschlag. Dies sollte zusätzlich die Rücklaufquote der Umfrage erhöhen.

Insgesamt beteiligten sich an der Umfrage 212 Personen (Stichprobengröße). Dies entspricht rund 4,7 % der Gemeindebevölkerung älter als sechs Jahre. Etwa 10 % aller Schöllnacher Haushalte werden damit abgedeckt.

Die Zusammensetzung der Stichprobe nach Altersklassen und Geschlecht veranschaulicht **Abbildung 4.7**.

Die größte Häufigkeit tritt bei den weiblichen Befragten in der Altersgruppe 51-55 bzw. 56-60 auf, während bei den Männern der Modalwert bei 46-50 bzw. 51-55 Jahren liegt. Der Median kann mit einem Wert von 50 Jahren angegeben werden. Männliche Teilnehmer sind mit 58,6 % überproportional stark vertreten im Vergleich zu den weiblichen Teilnehmern mit 41,4 %.

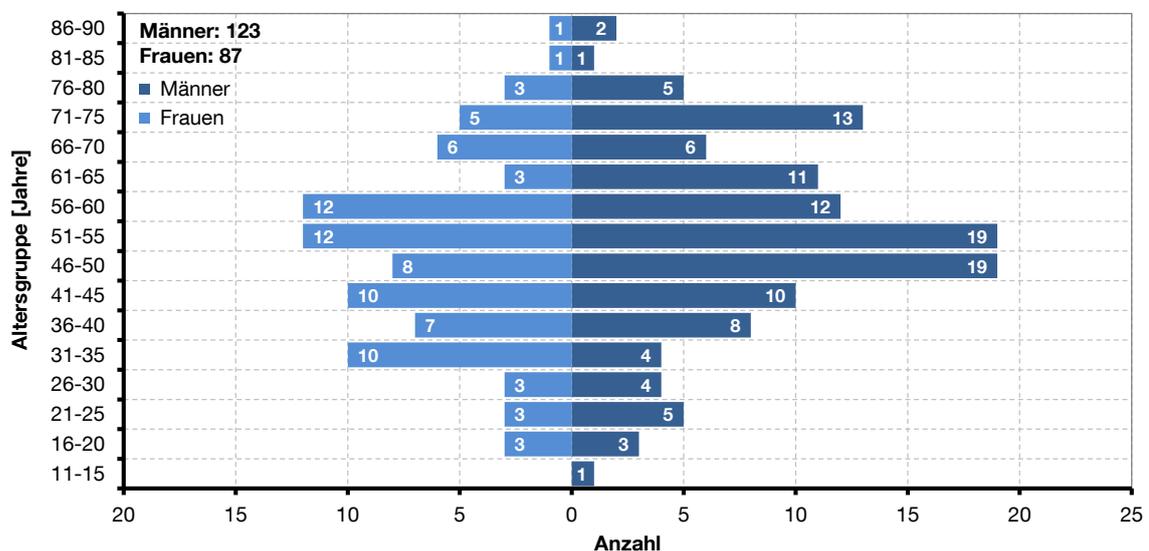


Abbildung 4.7: Stichprobenszusammensetzung nach Altersklassen und Geschlecht

Auffallend ist ferner der vergleichsweise große Anteil an älteren Personen auf der männlichen Seite. Mehr als 6 % sind zwischen 71 und 75 Jahre alt. Personen unter 11 Jahren beteiligten sich an der Umfrage nicht. Grundsätzlich nimmt die Teilnahme an der Umfrage mit steigendem Alter zunächst zu und erfährt eine Abnahme nach Erreichen des Modalwerts.

Aussagen zum Haushaltseinkommen oder zur Schulbildung können nicht getroffen werden. Diese Daten wurden nicht erhoben und waren nicht Bestandteil des Fragebogens.

4.3.2 Auswahlverfahren und Repräsentativität

Im Allgemeinen (wie auch im Fall der Untersuchungsgemeinde Schöllnach) ist es nur unter sehr großem zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich, sämtliche Personen einer Grundgesamtheit zu befragen und daraus Daten zu erheben (Vollerhebung). Aus diesem Grund muss auf eine Auswahl (Stichprobe) übergegangen werden.

In Umfragen, wie sie in dieser Studie Anwendung finden, ist die Gewährleistung der Repräsentativität von großer Bedeutung. Repräsentativität, d. h. die Sicherstellung der Freiheit von systematischen Verfälschungen, hängt in großem Maße vom Auswahlverfahren der Befragung (Stichprobenziehung) ab und wird darüber hinaus in gewisser Weise auch von der Größe der Stichprobe beeinflusst (in Hinblick auf den Vertrauensbereich). Es existieren mehrere Formen von Auswahlverfahren. Grundsätzlich ist zur Gewährleistung eines hohen Grades an Repräsentativität einer Umfrage die Ziehung einer Zufallsstichprobe (Zufallsauswahlverfahren) unerlässlich. Die Zufallsauswahl soll sicherstellen, dass jedem Element der Grundgesamtheit die gleiche Chance eingeräumt wird, in die Stichprobe aufgenommen zu werden. Ist die Ziehung einer Zufallsstichprobe erfolgreich durchgeführt worden, zeigt sich das Konfidenzintervall bzw. der Vertrauensbereich abhängig vom Stichprobenumfang (in erster Näherung von der Stichprobenstreuung/Standardabweichung, die durch $\sqrt{\text{Varianz}}$ gegeben ist). Eine Vergrößerung des Stichprobenumfangs geht einher mit einer Verschmälerung der Konfidenzintervalle und somit mit einer steigenden Güte der Ergebnisse. Ist eine Umfrage repräsentativ, kann von ihr ausgehend sinnvoll auf die Grundgesamtheit geschlossen werden (Repräsentationsschluss innerhalb bestimmter statistischer Fehlergrenzen).

Für die in dieser Studie durchgeführte Umfrage sind Einschränkungen der Repräsentativität der Stichprobe festzustellen. Einer Grundgesamtheit von etwa 4.550 Personen wurde im vorliegenden Fall eine Stichprobe von 212 Personen bzw. Haushalten entnommen. Durch die Verteilung der Fragebögen in Form einer Postwurfsendung ist sämtlichen registrierten Haushalten der Untersuchungsgemeinde ein Exemplar des Fragebogens zugestellt worden. Dies kommt im Prinzip einer Zufallsauswahl nahe. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass bei der hier durchgeführten Umfrage eine gewisse Selektivität stattfindet, die wiederum systematische Verfälschungen (Abweichung vom Zufallsprinzip) erzeugt. Werbeverweigerer werden durch das Verfahren der Postwurfsendung nicht erfasst. Obwohl diese in Schöllnach nur einen sehr geringen Bevölkerungsanteil ausmachen, kommt dadurch nicht jeder Person der untersuchten Grundgesamtheit die Möglichkeit zu, an der Umfrage teilzunehmen und in die Stichprobe zu gelangen. Des Weiteren waren nicht alle Perso-

nen bzw. Haushalte, die zur Teilnahme an der Umfrage ausgewählt wurden, bereit, den Fragebogen auszufüllen und zurückzusenden. Eine Sicherstellung der Beantwortung des Fragebogens z. B. durch (telefonische) Aufforderung der ausgewählten Personen fand nicht statt.

Die vorliegende Umfrage führt aus den oben genannten Gründen zu einer eingeschränkten Repräsentativität der Ergebnisse. Die Stichprobe wurde gewissermaßen nur einer Teilmenge der Bevölkerung entnommen, die bereit und in der Lage war, zur Datenerhebung beizutragen. Die Annahme eines zufälligen Auswahlprozesses ist als kritisch zu betrachten. Bei derartigen empirischen Methoden muss jedoch entscheidend darauf geachtet werden, dass die Struktur der Stichprobe der Struktur der Grundgesamtheit entspricht. Dies trifft im vorliegenden Fall nur bedingt zu.

Die Rücklaufquote der Umfrage beträgt etwa 5 % (personenbezogen). Durch den geringen Stichprobenumfang sind deshalb Fehlschlüsse nicht gänzlich auszuschließen. Für die Auswertung und Interpretation der Umfrage in Kapitel 5.3.1.1 können jedoch Aussagen über die Stichprobe getroffen und Tendenzen für die Merkmalsausprägungen innerhalb der Gemeinde Schöllnach angegeben werden.

4.3.3 Fragebogenstruktur

Der verschickte Fragebogen gliedert sich in die drei Bereiche Haushalt, Person und Mobilität. Der den Haushalt betreffende erste Teil erhebt Daten zur Lage und Größe des Haushaltes sowie zum Alter der Haushaltsmitglieder. Anschließend folgen im zweiten Teil Fragen zur Person. Dabei werden neben den Personalangaben wie Geschlecht, Geburtsjahr oder Familienstand Daten zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz ermittelt (Lage, Arbeits-/Unterrichtszeiten). Weitere Fragen legen den Fokus auf die Verfügbarkeit von Führerscheinklassen, Verkehrsmittel oder Pkw-Stellplätze zuhause oder am Arbeitsplatz. Der dritte Bereich gilt der Erfassung der individuellen Mobilität jedes Umfrageteilnehmers. Hier wird nach der Anzahl an zurückgelegten Wegen und Distanzen gefragt sowie dem Verhalten hinsichtlich Fernreisen und Dienstreisen nachgegangen.

Tabelle 4.1 fasst die Datengrundlagen der Befragung zusammen und gibt einen Gesamtüberblick. Die gewonnenen Basisdaten werden anschließend zum Zwecke der Analyse der räumlichen und zeitlichen Mobilitätsstruktur zu wesentlichen Indikatoren und Kennzahlen zusammengefasst. Diese ermöglichen die Bildung einer Basis zur Beschreibung des Mobilitätsverhaltens und erlauben zudem direkte Vergleiche mit anderen Untersuchungsregionen.

In der vorliegenden Untersuchung lassen sich aus den umfragebasierten Erkenntnissen folgende Kennwerte und Indikatoren zur Beschreibung der Mobilität in der Gemeinde Schöllnach ableiten:

- Modal Split: Verteilung des Verkehrsaufkommens (Wege) oder der Verkehrsleistung (Kilometer) auf verschiedene Verkehrsmittel
- Wegehäufigkeit: Anzahl der Wege pro Einwohner (und pro Tag)
- Weglängen: Distanz zwischen Startort und Zielort differenziert nach Wegezweck
- Ausstattung mit Verkehrsmitteln (Pkw): Anzahl der Personen, die einen Pkw besitzen (oder anderes Verkehrsmittel)
- Ausstattung mit Garage oder Pkw-Stellplatz: Anteil der Bevölkerung, der über einen Pkw-Stellplatz verfügt

Die aufgelisteten Kennzahlen werden für die Testgemeinde Schöllnach in Kapitel 5.3 analysiert und diskutiert (Stichprobe). Der vollständige Fragebogen kann im Anhang eingesehen werden.

Tabelle 4.1: Datengrundlagen aus der Mobilitätsbefragung in Schöllnach

Kategorie	Attribut	Beschreibung/Ausprägungen
Haushalt	PLZ/Ortsteil	Lage des befragten Haushaltes (Postleitzahl, Ortsteil von Schöllnach)
	Anzahl Personen	Anzahl der Personen im befragten Haushalt (< 6 Jahre, 6-18 Jahre, > 18 Jahre)
Person	Geschlecht	Geschlecht der befragten Person (männlich, weiblich)
	Geburtsjahr	Geburtsjahr der befragten Person
	Familienstand	Familienstand der befragten Person (verheiratet/eingetragene Partnerschaft; verheiratet, aber getrennt lebend; ledig; nicht verheiratet, mit Partner lebend; geschieden/getrennt lebend; verwitwet; keine Angabe)
	Arbeits-, Ausbildungsplatz	Lage des Arbeits-, Ausbildungsplatzes (im Kernort Schöllnach, außerhalb des Hauses; anderer Ortsteil/Ort; ich führe den Haushalt/ich arbeite zuhause; ich arbeite nicht/nicht mehr)
	Arbeits-, Unterrichtszeiten	Arbeits-, Unterrichtszeiten (Start und Ende) in Stunde und Minute
	Führerscheinklasse	Erworbene Führerscheinklassen (Pkw, Kleinkraftrad (Moped/Roller bis 50 ccm), Leichtkraftrad (bis 125 ccm), Motorrad, ich besitze keinen Führerschein)
	Zeitfahrkarte ÖPNV	Vorhandensein und Nutzung einer ÖPNV-Zeitfahrkarte (ja, nein)
	Verkehrsmittel	Verfügbare Verkehrsmittel im Haushalt (Pkw (Verbrennungsmotor), Pkw (Elektro-, Hybridantrieb), Dienst-Pkw, Moped/Roller/Motorrad, Fahrrad, Elektrofahrrad)
	Fahrzeugklasse	Anzahl und Fahrzeugklasse der verfügbaren Pkw (Kleinstwagen, Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse, Obere Mittelklasse, Oberklasse, Sportwagen, Geländewagen/SUV, Elektro-/Hybrid-Pkw)
	Pkw-Stellplatz	Vorhandensein eines Pkw-Stellplatzes zuhause und am Arbeitsplatz und Anzahl (ja, nein)

<i>Kategorie</i>	<i>Attribut</i>	<i>Beschreibung/Ausprägungen</i>
Mobilität	Wegezweck	Zuordnung von Wegezwecken und Aktivitäten (Arbeit/Arbeitsplatz; Dienstreise/Wechsel Dienstort; Bildungseinrichtung/Ausbildung; Einkauf; Private Erledigungen; Familienbesuch/Besuch; Sportstätte, Sporteinrichtung; Gaststätte, Kneipe, Bar; Kultur, Theater, Kino; Erholung, Sport im Freien; Sonderveranstaltung; Andere Aktivität)
	Verkehrsmittel	Zuordnung von genutzten Verkehrsmitteln (zu Fuß; Fahrrad; Elektrofahrrad; Motorrad/Moped/Roller/Mofa; Pkw als Fahrer; Pkw als Mitfahrer; Pkw Elektro-, Hybridantrieb; Linienbus/Stadtbuss; Pendelbus/Firmenbus; Reisebus/Fernbus; Bahn/Fernzug; Flugzeug; Taxi; Anderes Verkehrsmittel)
	Fernreisen	Durchgeführte Fernreisen (Start, Ziel, Verkehrsmittel, Entfernung, Zweck)

Die vorgestellten unterschiedlichen Methoden (Raum- und Energiemodelle sowie empirische Analysen) liefern Ergebnisse, die zur Beantwortung der Frage nach der Eignung der Untersuchungsregionen Singapur, Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach für die Integration von Elektrofahrzeugen verwendet werden. Diese Ergebnisdarstellung ist Bestandteil von Kapitel 5.

5 Fallbeispiele: Ergebnisdarstellung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Integration von elektromobilen Antriebskonzepten in unterschiedliche Strukturen vorgestellt. Die Untersuchungskriterien Verkehrs- und Parkraumstruktur, Energieinfrastruktur und zukünftige Energieversorgung in den einzelnen Regionen sowie eine erste Kostenabschätzung für Ladeinfrastruktursysteme finden hier Berücksichtigung. Anhand der ausgewählten Fallbeispiele sollen grundlegende Aussagen in Zusammenhang mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen und der Entwicklung von Ladeinfrastrukturen in den jeweiligen Regionen getroffen werden. Zudem soll deutlich werden, welche Rolle die Elektromobilität heute spielt und welche Bedeutung ihr in zukünftigen nachhaltigen Energiesystemen in diesen Städten und Regionen zukommen könnte.

5.1 Megastadt Singapur

Zunächst werden die für die Megastadt Singapur ermittelten Ergebnisse diskutiert, indem die Besonderheiten entsprechend der Analyse der Kriterien aufgezeigt werden.

5.1.1 Verkehrs- und Parkraumstruktur

Einleitend liegt der Schwerpunkt auf den wesentlichen Mobilitätskenngrößen für Singapur. Diese sollen zu Beginn kurz vorgestellt werden.

Das Mobilitätsverhalten kann unter anderem durch den Modal Split beschrieben werden, der die Anteile verschiedener Verkehrsmittel am gesamten Verkehrsaufkommen angibt. Für Singapur ist die Zusammensetzung des Verkehrsaufkommens in **Abbildung 5.1** gezeigt.

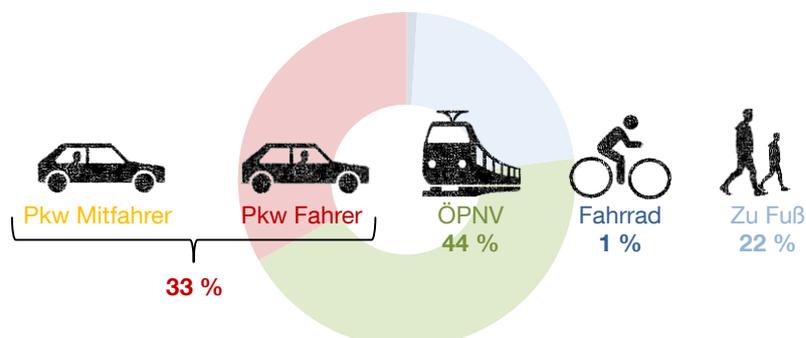


Abbildung 5.1: Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Singapur (Daten: [109])

Auffallend ist hierbei der relativ große Anteil des öffentlichen Personenverkehrs an den Gesamtwegen von 44 %. Mehr als drei Wege werden in Singapur im Individualverkehr zurückgelegt. In diese Kategorie fallen neben der Nutzung eines Pkw als Fahrer oder Mitfahrer auch Fahrten mit Taxis. Während 22 % aller in Singapur durchgeführten Wege auf Fußwege entfallen, spielt das Fahrrad mit gerade einmal 1 % Anteil immer noch eine sehr unbedeutende Rolle. In ebenfalls sehr dicht besiedelten Städten wie Shanghai werden bereits mehr als 20 % der Wege mit dem Fahrrad zurückgelegt, davon sogar 10 % mit Elektrofahrrädern [109]. Obwohl der private Pkw-Verkehr in Singapur strengen Reglementierungen unterliegt, von der Regierung beschränkt wird und die Anschaffung eines Pkw aufgrund hoher Steuern vergleichsweise kostenintensiv ist, spielt vor allen Dingen aus persönlichen Statusgründen die Nutzung eines eigenen Pkw in Singapur eine große Rolle.

Für das Jahr 2015 beläuft sich die Zahl der zugelassenen privaten Pkw in Singapur auf 536.882. Zudem waren weitere 82.141 Pkw registriert. 28.736 Pkw werden derzeit für den Betrieb als Taxi eingesetzt. [110] Somit sind etwa 650.000 Personenkraftwagen auf der gesamten Landesfläche zu berücksichtigen. Diese Zahlen geben Aufschluss über den Motorisierungsgrad für Pkw, der in Singapur bei gerade einmal 0,12 Pkw pro Einwohner liegt. Dies ist unter anderem in dem geringen verfügbaren Raum im Stadtstaat (beschränkter Parkraum), aber auch in den Beschränkungen des Pkw-Verkehrs und Regelungen wie beispielsweise dem Electronic Road Pricing begründet.

Elektrofahrzeuge benötigen zur konventionellen Vollladung ihrer Batterien eine vergleichsweise lange Standzeit. Parken spielt also gerade vor dem Hintergrund einer passenden und sinnvollen Ladeinfrastruktur eine wesentliche Rolle. Um die zukünftige Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen in das Stadtgebiet von Singapur beurteilen zu können und Standorte zum Laden der Fahrzeugbatterien zu schaffen, ist ein Blick auf die aktuelle Situation im Verkehrs- und Parkraum der Megastadt sinnvoll. Die Beantwortung der Frage nach ausreichend Stellplätzen und Parkständen erfordert die Untersuchung verschiedener Konzepte zum Abstellen von Pkw.

Das sehr dicht besiedelte Stadtgebiet von Singapur lässt es nicht zu, eine große Anzahl an Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen zum Zwecke des Parkens abzustellen. Nur wenige Parkstände stehen der Bevölkerung zur Verfügung. Vielmehr ist es dort üblich, sowohl zuhause als auch am Arbeitsplatz oder in Freizeiteinrichtungen vorwiegend große Parkplätze sowie Tiefgaragen und Parkhäuser zum Abstellen von Fahrzeugen zu nutzen. Diese sind vor allen Dingen Bestandteil typischer Wohnanlagen in Singapur (z. B. in den Konzepten Housing Development Board (HDB) oder

Condominiums) und Einkaufszentren und stehen zudem über der gesamten Insel weitestgehend flächendeckend zur Verfügung.

Abbildung 5.2 zeigt linkerhand ein Beispiel der sehr begrenzten Anzahl an Parkständen auf öffentlichen Straßen (hier in der Gegend um China Town). Im Allgemeinen werden in Singapur aber Fahrzeuge in Parkgaragen oder großen Parkplätzen abgestellt, wie das Bild rechts am Beispiel des Condominiums Guilin View im Westen der Stadt zeigt.

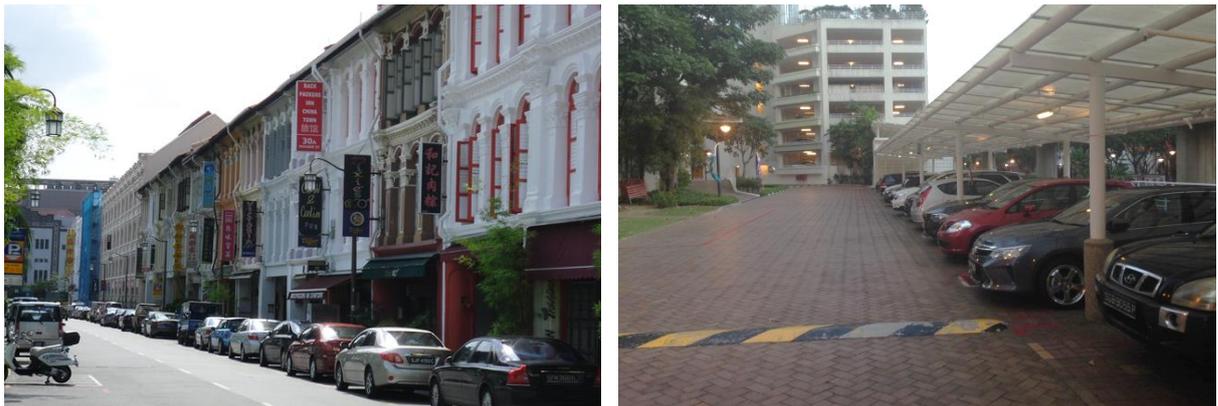


Abbildung 5.2: Begrenzte Parkmöglichkeiten am Straßenrand in Singapur (links) und Unterbringung von Pkw in Parkgaragen (rechts) (Fotos: M. Wagner (2011), K. Schönsteiner (2015))

In [111] wurden 14 große Städte und Ballungsräume in Ost-, Südost- und Südasien auf ihre Parkraumbewirtschaftung hin untersucht. Die in dieser Studie erhobenen Daten sind für Singapur, Manila und Peking in **Abbildung 5.3** visualisiert.

Die Studie ermittelt, welche Orte zum Parken von Pkw für verschiedene Zwecke (zu Hause, am Arbeitsplatz oder in Freizeiteinrichtungen) genutzt werden. Die für Singapur festgestellten Verhältnisse hinsichtlich des Abstellortes für Pkw bestätigen obige Annahme der geringen Attraktivität des Straßenparkens. Zuhause stellen 95 % der Fahrzeugnutzer ihren Pkw innerhalb der Wohnanlage ab. Dabei dürfte als Unterbringungsmöglichkeit in den meisten Fällen eine Parkgarage innerhalb eines abgeschlossenen Condominiums oder ein an eine HDB-Anlage angrenzender Parkplatz in Frage kommen. Aber auch die Möglichkeit, das Fahrzeug in der Privatgarage (innerhalb der Wohnanlage) abzustellen, ist hier miteingeschlossen. 5 % parken ihr Fahrzeug jedoch auch an/auf der Straße. Dies dürfte hauptsächlich an weniger befahreneren Straßen und in von Pkw weniger frequentierten Gebieten (z. B. China Town oder Little India) der Fall sein oder in Wohnsiedlungen, die vorwiegend von Einfamilienhäusern geprägt sind. Ein gewisser Prozentsatz parkt sein Fahrzeug vermutlich auch in Privatgaragen (Einzel- oder Doppelgaragen), die ebenfalls meistens

in Einfamilienhaussiedlungen vorzufinden sein. Die Daten sind jedoch nicht differenzierter als angegeben ausgewiesen.

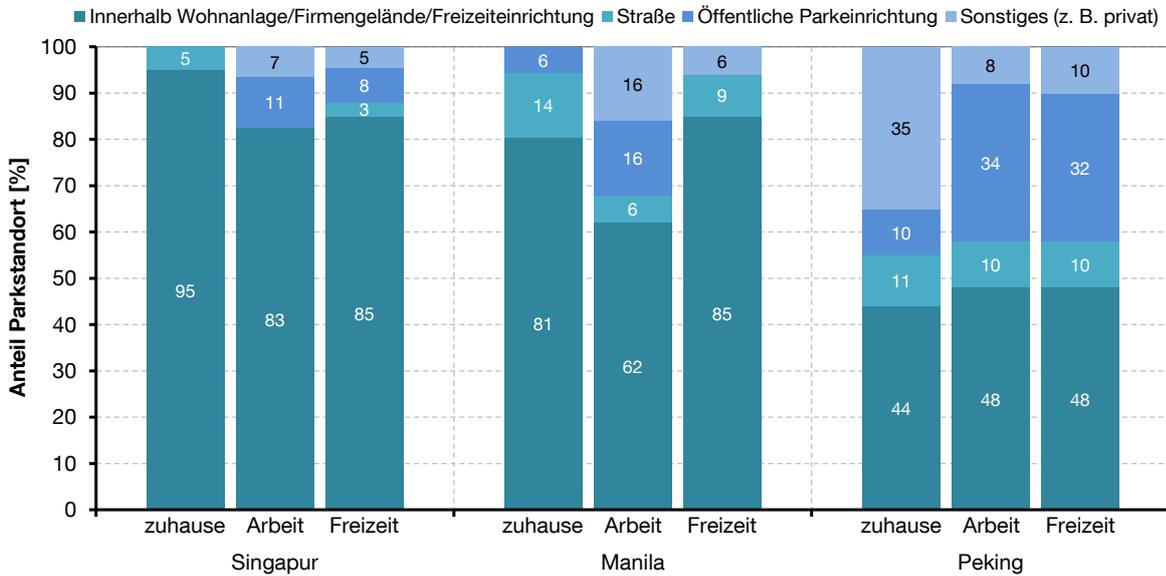


Abbildung 5.3: Parkstandorte zuhause, am Arbeitsplatz und während der Freizeit für die Städte Singapur, Manila und Peking (Daten: [111])

Auch am Arbeitsplatz dominiert in Singapur das Parken innerhalb des Firmengeländes, wobei auch in diesem Fall hauptsächlich mehrstöckige Parkgaragen oder Parkplätze auf dem Gelände eingesetzt werden. Straßenparken ist für diesen Zweck gänzlich uninteressant. 18 % der Befragten nutzen zudem öffentliche oder private Parkeinrichtungen. Da mehrstöckige Parkhäuser in der Regel auch Bestandteil von Freizeiteinrichtungen sind (z. B. Einkaufszentren), in welchen beispielsweise eingekauft, gegessen oder anderen Aktivitäten nachgegangen wird, entfällt auch für den Zweck Freizeit ein hoher Anteil von 85 % auf die Unterbringung von Fahrzeugen innerhalb der Freizeiteinrichtungen, gefolgt von öffentlichen Parklösungen.

Städte wie Manila oder Peking zeigen zwar im Vergleich zu Singapur ebenfalls starke Ausprägungen von Abstellmöglichkeiten innerhalb der Wohnanlage, des Firmengeländes oder der Freizeiteinrichtung, Fahrzeugnutzer setzen aber in beiden Beispielen auch deutlich auf Parkplätze auf der Straße, in öffentlichen oder privaten Parkeinrichtungen. Abbildung 5.3 verdeutlicht also, dass in Singapur Parken von Pkw auf Straßen für die Nutzer relativ unattraktiv ist und stattdessen Lösungen innerhalb der Einrichtungen gewählt werden. In der Regel sind dies überdachte Parkplätze oder mehrstöckige Parkgaragen, aber auch Einzel- und Doppelgaragen.

Zur Beschreibung der Parkraumstruktur Singapurs können die von [112] bereitgestellten digitalen Geodaten verwendet werden. Aufgrund der heterogenen Gebäudestruktur und der Vielzahl an unterschiedlichen Wohnkonzepten in Singapur ist zunächst die Verteilung der Gebäudetypen zu beurteilen. Eine Zusammenfassung zeigt **Abbildung 5.4**. Zusätzlich konnten mittels Analyse von Luftbildern und Vergleich mit den vorliegenden digitalen Daten die definierten Kategorien weiter differenziert und deren Struktur abgeleitet werden.

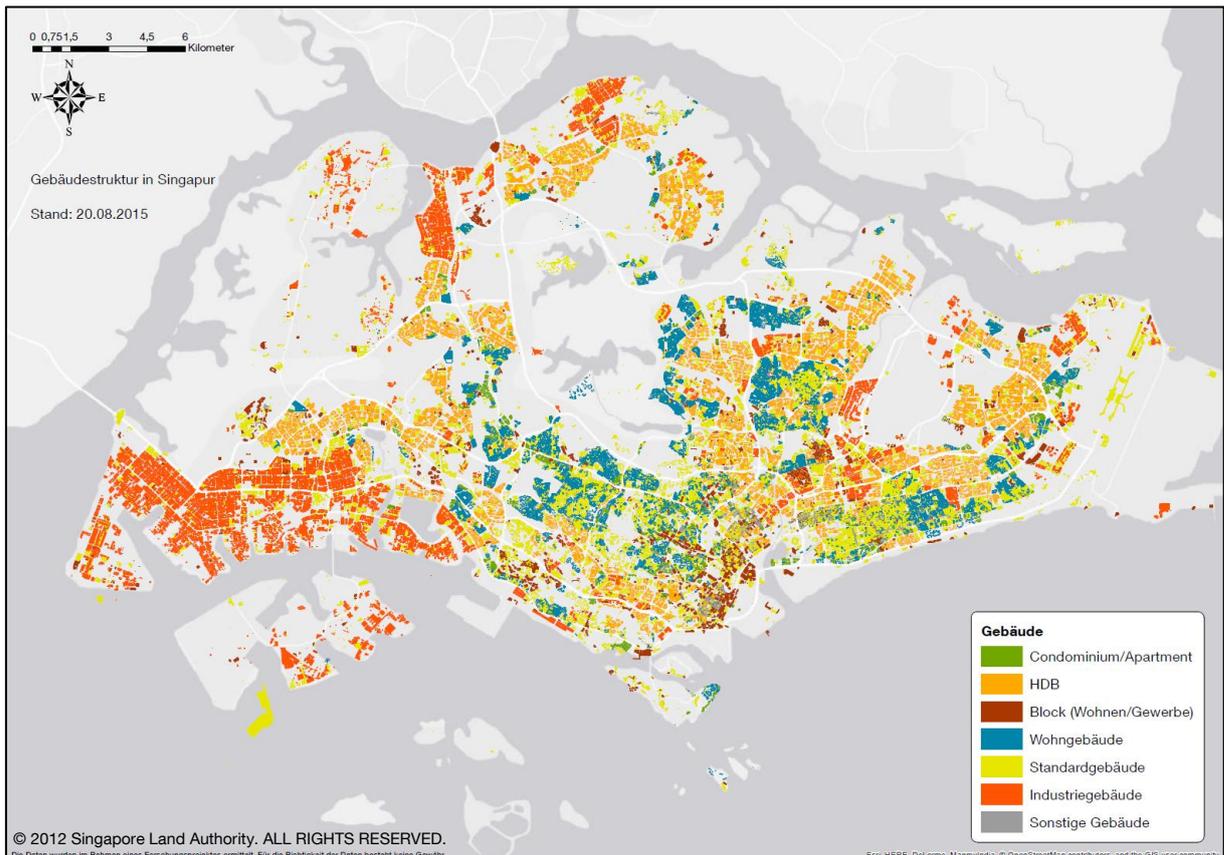


Abbildung 5.4: Klassifizierung von Gebäuden in Singapur (Daten: [112])

Die Gebäudetypen Condominium/Apartment und HDB sind in Singapur weit verbreitet. HDB-Wohnungen unterliegen dem öffentlichen bzw. staatlichen Wohnungsbau und werden vom Singapurischen Staat verwaltet. Condominiums oder Apartments bieten als meist bewachte Wohnanlagen mit Einrichtungen wie Pools oder Fitnessstudios einen gehobeneren Wohnstandard. Der Typ Block repräsentiert Gewerbe- oder Wohnblöcke, wobei die Analyse zeigte, dass auf diesen Typ größtenteils Firmengebäude oder Freizeiteinrichtungen und nur wenige Wohngebäude entfallen. Obige Grafik (Abbildung 5.4) macht deutlich, dass auch Wohnkonzepte basierend auf Ein- oder Mehrfamilienhäusern (MFH) in Singapur vorzufinden sind (Kategorie Wohngebäude). Zahlreiche derart strukturierte Siedlungen sind über die Insel verteilt

vorzufinden. Zusätzlich enthält diese Kategorie aber auch größere Condominium-Anlagen. Zur Kategorie Standardgebäude zählen neben vereinzelt Wohngebäuden (Condominiums, EFH/MFH) hauptsächlich aber Gebäude von Bildungseinrichtungen, Freizeiteinrichtungen oder von Gewerbebetrieben.

Allein 80 % aller Haushalte in Singapur werden durch den öffentlichen Wohnungsbau in HDB-Gebäuden abgedeckt. In Condominiums und Apartments leben insgesamt 13,5 % der Bevölkerung. Die restlichen Haushalte lassen sich Einfamilien-, Mehrfamilien- und Reihenhäusern oder sonstigen Wohnkonzepten zuteilen. [85] So sind knapp 94 % aller Haushalte in Wohnanlagen vorzufinden, die in der Regel keinen privaten Einzelstellplatz für die Pkw der Bewohner zur Verfügung stellen, sondern stattdessen die Fahrzeuge in aggregierter Form in großen überdachten Parkplätzen oder mehrstöckigen Parkhäusern/Tiefgaragen unterbringen. Diese Ergebnisse zusammen mit den Zahlen aus Abbildung 5.3 machen deutlich, dass in Singapur Pkw vorwiegend in dafür (z. T. vom Staat) zur Verfügung gestellten Einrichtungen geparkt werden (Parkgarage, Parkplatz) und Parken auf öffentlichen Straßen unattraktiv ist und daher vernachlässigt wird. Ein gewisser Teil an Pkw, die in privaten Einzelgaragen untergebracht werden, ist dennoch vorhanden.

Die zur Verfügung stehenden digitalen Geodaten, die zur Abschätzung der Parkmöglichkeiten in Singapur genutzt werden, berücksichtigen lediglich mehrstöckige Parkhäuser bzw. Tiefgaragen sowie Parkplätze von staatlichen HDB-Wohnanlagen. Parkgaragen in Condominiums oder öffentliche Parkgaragen in Freizeiteinrichtungen oder an Arbeitsplätzen stehen zunächst nicht verortet zur Verfügung. Zur Ermittlung der Gesamtzahl von Parkeinrichtungen und Parkplätzen innerhalb dieser Einrichtungen sind folglich Abschätzungen vorzunehmen. Für die Kategorie der HDB-Gebäude können innerhalb der zur Verfügung stehenden Parkhäuser und Tiefgaragen etwa 370.000 Stellplätze verteilt über ganz Singapur ermittelt werden. Da keine Informationen über die Anzahl der oberirdischen oder unterirdischen Geschosse vorliegen, wird angenommen, dass ein innerhalb einer Wohnanlage gelegenes Parkhaus oder eine Tiefgarage im Mittel über vier Ebenen verfügt, die zum Abstellen von Pkw genutzt werden können. Zur Berücksichtigung von nicht beparkbaren Flächen (z. B. Einfahrten oder Auffahrten) wird ein Faktor von 0,60 veranschlagt (40 % der Fläche der Parkeinrichtung sind somit mit anderweitigen Funktionen belegt und stehen nicht als Parkplatzfläche zur Verfügung). Nicht allen HDB-Anlagen steht ein überdachtes Parkgebäude zur Verfügung. Häufig verfügen die Wohnanlagen auch nur über unmittelbar an die entsprechenden Gebäude angrenzende Parkplätze (teilweise überdacht). Auch diese Möglichkeit der Unterbringung von Pkw kann mithilfe der

bereitgestellten Daten betrachtet werden. Unter der erneuten Annahme, dass 60 % der als Parkplatzfläche ausgewiesenen Fläche genutzt werden können, ergibt sich insgesamt für alle HDB-Anlagen in Singapur eine Stellplatzanzahl von gut 450.000. Die auf den ersten Blick vergleichsweise hoch erscheinende Zahl und die Annahme von 60 % nutzbarer Fläche konnten durch Stichproben und Ermittlung der Stellplätze innerhalb HDB-Parkplätzen bestätigt werden. Auffallend ist ferner, dass die an HDB-Gebäude angrenzenden Parkplätze häufig eine sehr geringe Belegung aufweisen. Dies ist teilweise auch in Parkgaragen zu beobachten. Auch in [111] wird festgestellt, dass in HDB-Anlagen bezogen auf die Wohneinheiten und den im Vergleich zu Condominiums geringen Anteil des Pkw-Besitzes vergleichsweise viele Parkplätze zur Verfügung stehen. Im Jahr 2009 betrug das Verhältnis aus HDB-Parkplätzen und HDB-Wohneinheiten 63 %. Die hier durchgeführte Analyse ermittelte ein Verhältnis von ca. 80 %.

Die in [111] angegebenen Richtwerte für Stellplätze und Parkstände abhängig von der Bruttogrundfläche (Wohnraum) erlauben eine Abschätzung von Stellplätzen in Condominiums und Apartment-Anlagen. Im Schnitt werden in Singapur pro 100 m² für kleine und mittlere Wohnungen 1,3 Stellplätze veranschlagt. Die Anforderungen an das Parken zuhause in der Wohnanlage richten sich in Singapur nach Wohneinheiten, was zu relativ hohen Anforderungen pro m² für kleinere Wohnungen führen kann. Wird dieser Wert auf die Summe aller Condominiums und Apartments angewendet, können für diese Art von Wohnanlagen etwa 140.000 weitere Stellplätze berechnet werden.

Stellplätze in Wohnsiedlungen, die von Ein- oder Mehrfamilienhäusern geprägt sind, können mittels der bereitgestellten Daten ebenfalls abgeleitet werden. Unter der Annahme, dass jedes Einfamilienhaus oder Reihenhaus über mindestens einen Pkw-Stellplatz auf dem Grundstück verfügt, kann von ca. 70.000 privaten Garagen- oder Carport-Stellplätzen unmittelbar in der Nähe des Wohnhauses ausgegangen werden. Das Statistische Jahrbuch gibt für das Jahr 2014 in Singapur 69.400 Haushalte an, die über Grundbesitz und ein darauf befindliches Wohngebäude verfügen können [85].

Die Vorgehensweise unter Berücksichtigung von flächenspezifischen Richtwerten kann auch Anwendung finden, um eine grobe Abschätzung der Stellplätze für Büro-, Handelsgebäude oder Einkaufszentren (Freizeiteinrichtungen) in Singapur durchzuführen. Hier ist mit durchschnittlich 0,42 Stellplätzen pro 100 m² Bruttogrundfläche zu rechnen. Während für Bürogebäude im Central Business District 0,2 Stellplätze gelten, kann für Einkaufszentren ein spezifischer Wert von 0,5 Stellplätzen/100 m²

angegeben werden [111]. Insgesamt können für den Zweck Arbeit/Freizeit etwa 540.000 Einzelstellplätze festgestellt werden. Zusätzlich wird unterstellt, dass ca. 70 % der zu diesem Zweck berücksichtigten Gebäude Büro- und Gewerbegebäude sind und etwa 30 % Freizeiteinrichtungen und Einkaufszentren repräsentieren. Stellplätze, die zum Zwecke der Arbeit von Pkw-Nutzern z. B. angegliedert an Bürogebäude angefahren werden können, stehen in Singapur somit in Höhe von 380.000 zur Verfügung. Auf Freizeiteinrichtungen entfallen 160.000 Parkplätze. Nicht unterschieden werden kann an dieser Stelle zwischen Stellplatz im Freien oder innerhalb eines Parkhauses. Beide Kategorien werden somit identisch behandelt.

Insgesamt zeigt sich eine vergleichsweise plausible Verteilung der Parkstände und Stellplätze in Parkhäusern, Tiefgaragen und Parkplätzen auf die Standorte zu Hause, Arbeit und Freizeit. 960.000 Stellplätze finden sich in Condominiums, HDB- und Apartment-Anlagen wieder. Dies entspricht etwa 61 % aller ermittelten Stellplätze. 24 % oder 380.000 Stellplätze können dem Zweck Arbeit und hier z. B. den Bürogebäuden zugeordnet werden. 160.000 Parkplätze (10 %) können in Freizeiteinrichtungen hauptsächlich in Einkaufszentren genutzt werden.

Zur besseren Beurteilung der Parkplatzstruktur in der Megastadt Singapur sind in **Abbildung 5.5** alle ermittelten Stellplätze dem Pkw-Bestand in Singapur gegenübergestellt.

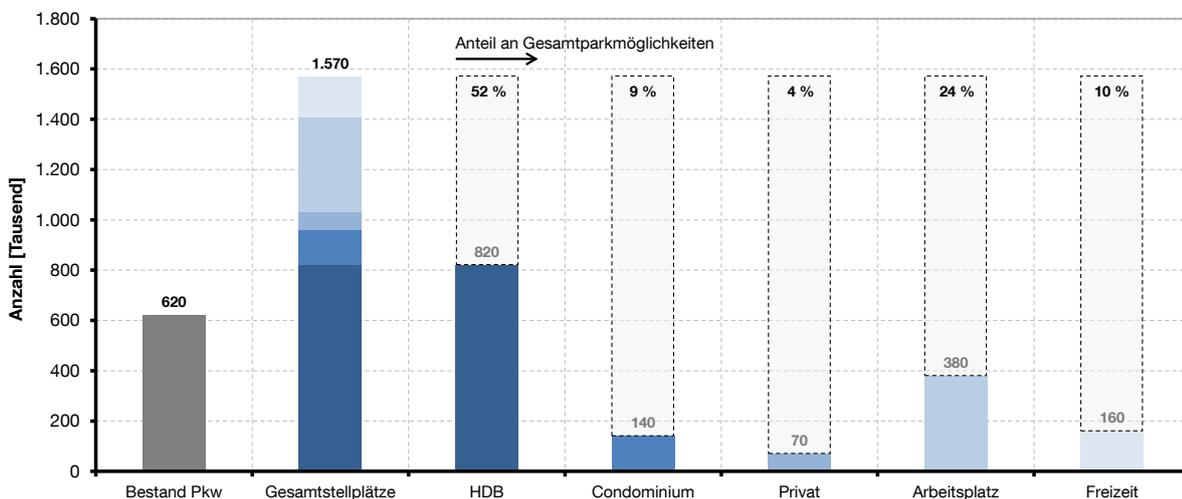


Abbildung 5.5: Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Singapur

Bemerkenswert ist die enorme Anzahl an insgesamt zur Verfügung stehenden Abstellmöglichkeiten von etwa 1,6 Mio. für einen Pkw-Bestand von lediglich 620.000. Natürlich muss hinzugefügt werden, dass neben Pkw in Singapur eine große Anzahl an Zweirädern sowie leichten und schweren Nutzfahrzeugen existiert, die hier nicht

berücksichtigt wird. Es kann zusätzlich festgehalten werden, dass viele Parkeinrichtungen vor allen Dingen in Condominiums überdimensioniert ausgelegt sind und mehr Parkplätze vorhalten als eigentlich notwendig. So sind häufig ein oder mehrere Decks in Park- oder Tiefgaragen für Besucher reserviert und werden im Allgemeinen von den Bewohnern der Anlage nicht genutzt.

5.1.2 Energieinfrastruktur und Strombereitstellung

Neben der Bewertung der Integration von Elektrofahrzeugen in Bezug auf die Parkraumstruktur in Singapur ist es zudem essentiell, die energiewirtschaftliche Integration sowie die Möglichkeiten der Ladestrombereitstellung für Elektrofahrzeuge in Singapur zu untersuchen und zu beurteilen.

In Kapitel 4.2 wurde die Methodik des entwickelten Energiesystemmodells, das zur Analyse der Energieinfrastruktur in Singapur zum Einsatz kommt, sowie die Ausgestaltung des Modells beschrieben. Die damit erarbeiteten Ergebnisse zu Besonderheiten der Energieinfrastruktur sowie des Zusammenspiels des singapurischen Energiesystems mit der Implementierung von unterschiedlichen Typen von Elektrofahrzeugen werden in folgenden Ausführungen detailliert diskutiert. Dabei wird im Wesentlichen auf die Ergebnisse aus [105–107, 113] zurückgegriffen.

Die Struktur der Stromerzeugung in Singapur war im zurückliegenden Jahrzehnt massiven Veränderungen unterworfen. Aus der Perspektive der zur Stromerzeugung verwendeten Energieträger stellt dies einen Paradigmenwechsel von einer erdöldominierten zu einer nun erdgasdominierten Erzeugung dar. Die Entwicklungen im Stromerzeugungsmix sowie im Strombedarf in Singapur in den vergangenen 15 Jahren lassen sich in **Abbildung 5.6** nachvollziehen.

Im Jahr 2000 war die Stromerzeugung zu 82 % im Wesentlichen noch von Erdölprodukten bestimmt, Erdgas trug zu einem Fünftel zur Stromerzeugung bei. Im weiteren Verlauf übernahmen jedoch nach und nach erdgasbefeuerte Kraftwerke die Stromerzeugung. Ölkraftwerke verloren an Bedeutung und wurden teilweise außer Betrieb gesetzt oder aufgrund des gesteigerten Bedarfs reaktiviert, wie zuletzt in den Jahren 2010 und 2011 (sprunghafter Wirtschaftsanstieg nach der Finanzkrise). In den letzten Jahren ist ein weiterer deutlicher Rückgang des durch Erdöl erzeugten Stromes in Singapur festzustellen, sodass sich im Jahr 2014 die Gesamtstromerzeugung zu 95 % aus Erdgasstrom und zu 1 % aus Erdölstrom zusammensetzt.

Etwa 4 % stammen von sonstigen und erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen wie etwa Photovoltaikanlagen, Müllverbrennungsanlagen oder Biomassekraftwerke [114].

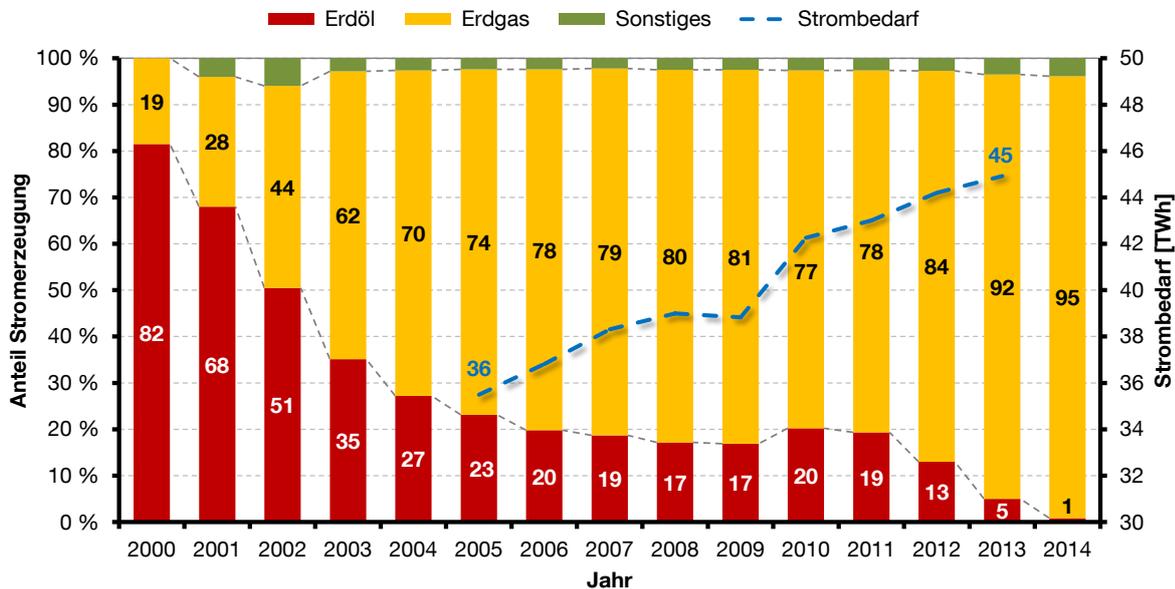


Abbildung 5.6: Entwicklung der Stromerzeugung und des Strombedarfs in Singapur (Daten: [114, 115])

Der Rückgang des erdölbasierten Anteils ist auf mehrere Gründe zurückzuführen. Neben steigenden Rohstoffpreisen bzw. Importpreisen für Erdöl in Singapur führt [116] zudem die Liberalisierung des Gas- und Elektrizitätsmarktes und fallende Erdgaspreise sowie einen größeren Wettbewerb in Singapur an. Der große Anteil von Erdgas an der aktuellen Stromerzeugung resultiert in einem reduzierten spezifischen Emissionsfaktor, der derzeit 450 g/kWh beträgt [114]. Erdgas und Erdöl können in Singapur nicht im eigenen Land gefördert und müssen importiert werden. Während Erdgas zu großen Teilen aus Malaysia stammt, führt Singapur Erdöl in der Hauptsache aus den Vereinigten Arabischen Emiraten, Saudi Arabien, Katar, Kuwait und Malaysia ein [117].

Innerhalb der letzten zehn Jahre erfuhr Singapur einen signifikanten Anstieg im Hinblick auf den Strombedarf. Steigende Bevölkerungszahlen und ein Anstieg in der Wirtschaftsleistung führten zu einem derzeitigen Strombedarf von etwa 45 TWh, einer Steigerung um 10 TWh innerhalb des vergangenen Jahrzehnts.

Die gegenwärtige Dominanz des Energieträgers Erdgas in Singapur spiegelt sich auch bei der Betrachtung der installierten Kraftwerkskapazitäten wider, wie sie für die Jahre 2000 bis 2014 in **Abbildung 5.7** dargestellt sind.

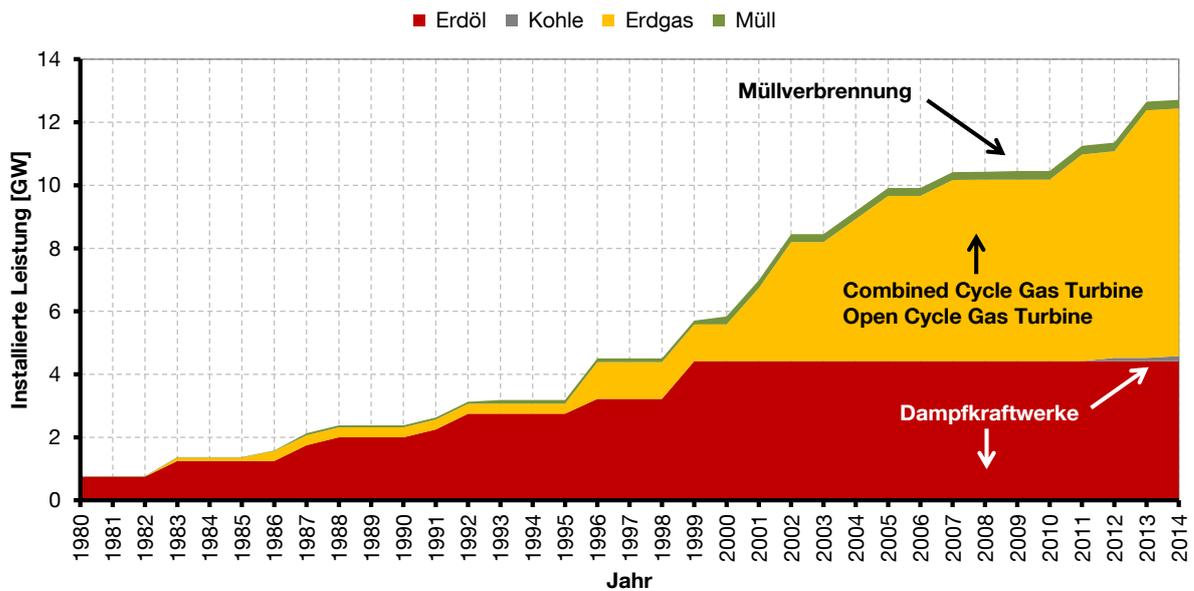


Abbildung 5.7: Installierte Kraftwerkskapazität in Singapur (Daten: [114, 115, 118, 119])

Bis zum Jahr 1999 waren erdölbefeuerte Dampfkraftwerke die wesentliche Stütze der Stromerzeugung in Singapur. In den Folgejahren erfuhr deren installierte Kapazität jedoch keine Erhöhung mehr und stagniert seitdem. Stattdessen kamen ab 1983 Erdgaskraftwerke in ihren Ausführungen als Combined Cycle Gas Turbines (CCGT) und Open Cycle Gas Turbines (OCGT) zum Einsatz und übertrafen hinsichtlich der installierten Kapazität die Erdölkraftwerke ab dem Jahre 2004. Zusätzlich existiert ein geringer Anteil an Kapazitäten für Kohlekraftwerke und Müllverbrennungsanlagen. Aktuell verfügt der Elektrizitätssektor in Singapur über eine installierte Kraftwerkskapazität von etwa 12,5 GW.

Singapur verfügt über keine eigenen Rohstoffressourcen. Auch im Bereich der regenerativen Energiequellen spielen im Inselstaat Singapur nur wenige Optionen eine Rolle. Aufgrund der beschränkten Landesfläche und der nur sehr geringen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten ist die elektrische Energieerzeugung aus Windkraft für Singapur keine wirtschaftliche Option. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt etwa 3,3 m/s und erlaubt somit keine nennenswerte Energieerzeugung. Trotzdem ist es denkbar, in der Zukunft Mikro-Windenergieanlagen zu betreiben, die mit deutlich geringeren mittleren Windgeschwindigkeiten zurechtkommen. [120]

Wesentlich vielversprechender als die Windkraftnutzung zeigt sich in Singapur die Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaikanlagen. Die Entwicklung der

installierten Photovoltaikanlagen in Singapur im Wohngebäude- und Nicht-Wohngebäudebereich ist für die Zeitreihe 2008 bis 2014 in **Tabelle 5.1** zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Installierte Photovoltaikanlagen in Singapur (Daten: [114])

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Installierte Kapazität in Wohngebäuden [MW _p]	0,0	0,1	0,1	0,2	0,7	1,2	1,6
Installierte Kapazität in Nicht-Wohngebäuden [MW _p]	0,3	1,9	3,6	5,6	9,1	13,8	17,4
Gesamt	0,4	1,9	3,7	5,8	9,8	15,0	19,0
Anzahl PV-Installationen in Wohngebäuden	6	13	19	35	82	129	164
Anzahl PV-Installationen in Nicht-Wohngebäuden	24	46	80	125	201	246	304
Gesamt	30	59	99	160	283	375	468

Die installierte Gesamtleistung im Jahr 2014 betrug 19,0 MW und verteilte sich auf 468 Anlagen. 304 Anlagen werden dabei von Verwaltungen und dem Housing Development Board betrieben [114]. Damit lassen sich rund 23 GWh an Strom produzieren, was gegenüber 2010 eine Steigerung um den Faktor fünf bedeutet. Dennoch ist der Beitrag der Photovoltaik im Vergleich zur derzeitig installierten Leistung (12,5 GW) und zum aktuellen Strombedarf (45 TWh/a) noch äußerst gering.

Mittelfristig kann davon ausgegangen werden, ein theoretisches Potential der elektrischen Energieerzeugung durch Photovoltaik in Singapur von etwa 7 TWh/a zu erreichen. Langfristig wird von 14 TWh/a ausgegangen. Diese Zahlen nehmen allerdings keine Rücksicht auf etwaige Restriktionen des heutigen Übertragungsnetzes und nehmen zudem auch innovative Konzepte wie Photovoltaikanlagen auf Gewässerflächen in die Abschätzungen mit auf. [121]

Der beschriebene Status Quo der Energieerzeugung bildet die Ausgangsbasis der durchgeführten Untersuchung in Singapur, bei der die Energieinfrastruktur bzw. die Zusammensetzung der Stromerzeugung für unterschiedliche Szenarien in Beziehung zu variierenden Zusammensetzungen des Verkehrssektors gesetzt wird.

Insgesamt werden bei der Modellierung des Energieerzeugungs- bzw. Elektrizitätssektors vier Technologiebeispiele zur Energieerzeugung definiert. Folgende Zusammensetzungen des Kraftwerksmixes sind Bestandteil der Untersuchung:

- Erdgas – Erdöl (Kraftwerkspark 1 [KWP 1]):
Für die zukünftige Energieerzeugung in Singapur wird angenommen, dass keine neuartigen Erzeugungstechnologien Einzug halten und weiterhin Erdgaskraftwerke die Stromproduktion bestimmen. Erdölkraftwerke werden in den Hintergrund gedrängt und in Zukunft außer Betrieb gesetzt. Weitere Energieerzeugungstechnologien werden nicht berücksichtigt.
- Erdgas – Erdöl – Photovoltaik (Kraftwerkspark 2 [KWP 2]):
Zusätzlich zu bestehenden Erdöl- und Erdgaskraftwerken werden Photovoltaikanlagen zur elektrischen Energieerzeugung eingesetzt. Der Ausbau von Photovoltaikanlagen ist ein wichtiger Aspekt in der singapurischen Energiepolitik. Nach [121] gilt die Annahme, dass kurzfristig 7 TWh Strom aus PV-Anlagen zur Verfügung gestellt werden können und bis 2050 das langfristige Potential von 14 TWh abgerufen werden kann.
- Erdgas – Erdöl – Photovoltaik – Kernkraft (Kraftwerkspark 3 [KWP 3]):
Obwohl Singapur auch nach den Zwischenfällen in Fukushima an einer Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Kernkraft gearbeitet hat, zwischenzeitlich den Bau von Kernkraftwerken aber ablehnt [122], wird in einem weiteren untersuchten Beispiel die Kernkraft als potentielle Elektrizitätsquelle betrachtet. Zugrunde gelegt wird eine Kapazitätsgrenze von 7 GW, die schrittweise bis zum Jahr 2050 erreicht wird.
- Erdgas – Erdöl – Photovoltaik – Kohle (Kraftwerkspark 4 [KWP 4]):
Analog zu Kraftwerkspark 3 wird in diesem Beispiel der Bau von Kohlekraftwerken als neue Erzeugungstechnologie bis zu einer maximalen Kapazitätsgrenze von 7 GW im Jahr 2050 zugelassen.

Zur Bewertung des energetischen Einflusses unterschiedlicher Fahrzeugtechnologien auf das Energiesystem in Singapur werden im Rahmen der Modellierung des Verkehrssektors ebenfalls vier verschiedene Zusammensetzungen angenommen. Dazu wird die Durchdringungsrate von alternativen Antriebstechnologien (Anteil der Personen- oder Tonnenkilometer des alternativen Verkehrsmittels an der Gesamtverkehrsleistung des Verkehrsmittels) definiert.

Nach Angaben der Singapore Land Transport Authority (LTA) wurde der Personenverkehr in Singapur im Jahr 2010 mit 42 % hauptsächlich von privaten Pkw bedient, gefolgt von der Singapurischen Schnellbahn (MRT – Mass Rapid Transport) mit 24 %. Der verbleibende Anteil der Verkehrsleistung im Personenverkehr spaltete sich auf in Busse (19 %), Taxis (9 %) und Zweiräder (6 %). Infolge von massiven Investitionen im öffentlichen Personenverkehr durch beispielsweise eine Verdopplung des Schie-

nennetzes der U-Bahn bis zum Jahr 2020 wird angenommen, dass deren Anteil an der Verkehrsleistung in Zukunft weiter ansteigen wird [123]. Zusätzlich wird auf Basis der Prädiktionen des singapurischen Bevölkerungswachstumes der Bedarf für Personen- und Gütertransporte innerhalb des Untersuchungszeitraumes bis 2050 ansteigen.

Die Untersuchung umfasst unterschiedliche Zusammensetzungen des Verkehrsmixes in Form folgender Szenarien:

- ICE (Internal Combustion Engine):
Angenommen wird die Fortführung der bestehenden Zusammensetzung des Verkehrssektors in die Zukunft. Sämtliche Straßenfahrzeuge sind benzin- oder dieselbetrieben und schrittweisen Effizienzverbesserungen unterworfen. Die Schnellbahn MRT basiert auf Elektrizität.
- BEV (Battery Electric Vehicle):
Batterieelektrische Fahrzeuge spielen die Hauptrolle im Verkehrsmix in dieser Zusammenstellung und substituieren Schritt für Schritt konventionelle Fahrzeuge. Unter Berücksichtigung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen als dominante Antriebstechnologie können die in **Abbildung 5.8** eingeführten Durchdringungsraten unterschiedlicher Verkehrsmittel angesetzt werden.

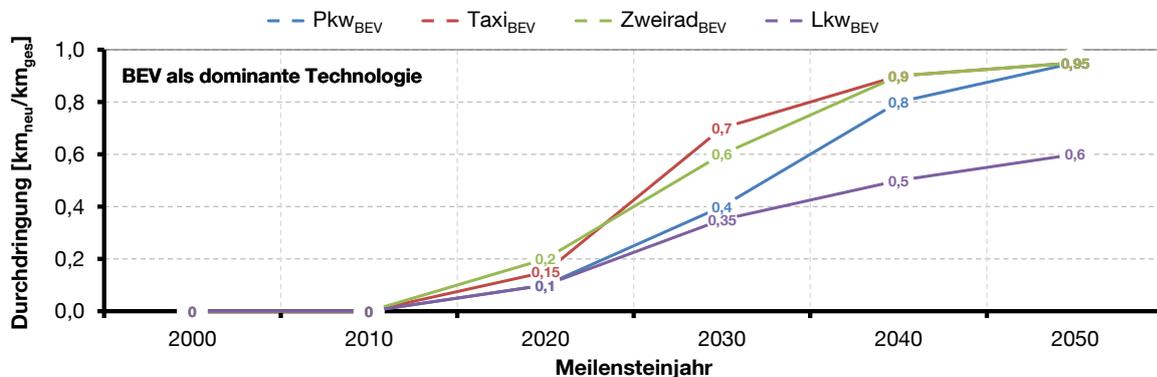


Abbildung 5.8: Durchdringungsraten unterschiedlicher Verkehrsträger im Falle des BEV als dominante Antriebstechnologie

Die angenommene Marktpenetration folgt der Form einer S-Kurve. Nach einer anfänglich schwachen Durchdringung bis 2020 folgt ein vergleichsweise hoher Anstieg bis zum Jahr 2040, der bis 2050 allmählich in Sättigung geht. Die größten Wachstumsraten sind bei Zweirädern (gute Eignung für Elektromobilität) und Taxis (Beeinflussung durch politische Rahmenbedingungen) festzustellen. Für Privatfahrzeuge werden geringere Steigerungsraten angenommen. Der flachere

Verlauf der Durchdringung für Lkw gründet sich auf einer höheren Fahrzeugmasse und dadurch höheren Batteriekosten für den elektrischen Betrieb. Deshalb wird lediglich eine Rate von 60 % im Jahr 2050 angesetzt, was der Verkehrsleistung von leichten Nutzfahrzeugen in Singapur entspricht. Leichte Nutzfahrzeuge dürften aus heutiger Sicht einfacher zu elektrifizieren sein als schwere Nutzfahrzeuge. Vollständig elektrifizierte Busse sind in dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt. Die Differenz zu 100 % wird durch konventionelle Diesel- und Benzinausführungen der entsprechenden Verkehrsträger gedeckt.

- **FCEV_{REF}** (Fuel Cell Electric Vehicle – Reforming)
In dieser potentiellen zukünftigen Zusammenstellung des Verkehrssektors ist das Brennstoffzellenfahrzeug als dominante Technologie anzusehen. Der benötigte Wasserstoff wird dabei durch Dampfreformierung erzeugt.
- **FCEV_{ELY}** (Fuel Cell Electric Vehicles – Electrolysis)
Im Gegensatz zum Szenario FCEV_{REF} wird der benötigte Wasserstoff in diesem Fall aus Elektrolyse von Wasser gewonnen. Die Wasserstoffherstellung beeinflusst die Effizienz und den Endenergiebedarf signifikant. Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb bilden auch hier die dominante Antriebstechnologie. Die entsprechenden Durchdringungsraten als Input für das Optimierungstool sind **Abbildung 5.9** zu entnehmen. Diese gelten gleichermaßen für beide FCEV-Technologien, unabhängig davon, ob der benötigte Wasserstoff durch Dampfreformierung oder Elektrolyse gewonnen wird, und orientiert sich an den Durchdringungsraten für batterieelektrische Fahrzeuge.

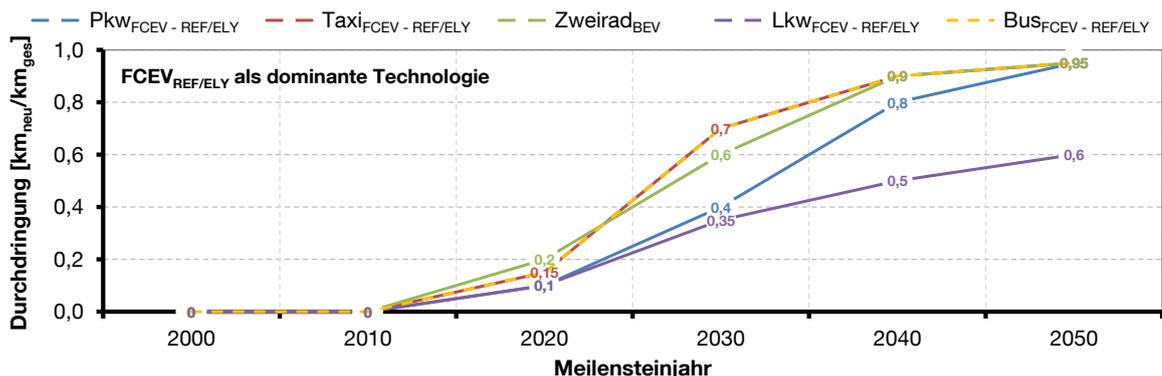


Abbildung 5.9: Durchdringungsraten unterschiedlicher Verkehrsträger im Falle des FCEV als dominante Antriebstechnologie

Angenommen wird weiterhin, dass Zweiräder rein batterieelektrisch betrieben werden und zukünftig über keinen Brennstoffzellenantrieb verfügen. Hohe

Durchdringungen sind erneut bei Taxis und zudem bei Bussen festzustellen. Leichte Nutzfahrzeuge erreichen eine Rate von 60 % im Jahr 2050.

Die unterschiedlichen Zusammensetzungen des Verkehrssektors zeigen sehr homogenes Verhalten. Grundsätzlich ist jeweils eine dominante Antriebstechnologie vertreten, während konventionelle Fahrzeuge (benzin- oder dieselbetrieben) als zweite Technologie eingesetzt werden. Ein Mix aus beispielsweise verbrennungsmotorisch, batterieelektrisch und brennstoffzellenelektrisch angetriebenen Fahrzeugen dürfte für die Zukunft wahrscheinlicher sein als der Einsatz nur einer Technologie. Dennoch kann durch die Untersuchung in Bezug auf die oben definierten Zusammensetzungen des Verkehrssektors als Extremszenarien ein besseres Verständnis für die Einflüsse unterschiedlicher Antriebstechnologien auf den Energiesektor in Singapur erlangt werden.

Nach Darlegung der Rahmenbedingungen für die Simulation verschiedener Zusammensetzungen des Verkehrssektors in Verbindung mit unterschiedlichen Kraftwerksparks können im Folgenden die wesentlichen Kernaussagen und Ergebnisse der Simulation in Bezug auf die Entwicklung des Primärenergiebedarfs sowie der CO₂-Emissionen diskutiert und bewertet werden.

Ergebnisse für Singapur

Zunächst ist zu bestimmen, welche Auswirkungen die oben definierten Zusammensetzungen der Fahrzeugflotten unter Berücksichtigung und Fortführung des derzeitigen Kraftwerksparks in die Zukunft (KWP 1) auf die Entwicklungen im Verkehrssektor in Singapur hätten. Dazu kann **Abbildung 5.10** herangezogen werden. Sie beschreibt die Zusammenhänge in Hinblick auf die Entwicklung sowohl des Primärenergiebedarfs als auch der CO₂-Emissionen für den Verkehrssektor. Die Ermittlung dieser Ergebnisse erfolgt mit TIMES Singapore.

Mit Ausnahme von brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen, die aus Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff einsetzen, ist ab dem Jahr 2010 in sämtlichen Szenarien ein Rückgang des Primärenergiebedarfs festzustellen. Die deutlichste Reduktion ist dabei beim Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen zu verzeichnen, die wesentlich höhere Effizienzen gegenüber verbrennungsmotorisch betriebenen sowie brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen aufweisen. Der vergleichsweise hohe Wirkungsgrad der Dampfreformierung jedoch resultiert für FCEV_{REF} in der zweithöchsten Gesamteffizienz bis zum Jahr 2040. Wird Wasserstoff aber durch Elektrolyse von Wasser gewonnen, führen die niedrigeren Wirkungsgrade des Prozesses zusammen mit

der Stromerzeugung zum höchsten Primärenergiebedarf aller betrachteten Szenarien.

Es ist festzuhalten, dass unter Beibehaltung von Gas- und Ölkraftwerken zur Stromerzeugung in Singapur die Zusammensetzung des Verkehrsmixes und die Integration innovativer Antriebstechnologien nur eine vergleichsweise geringe Differenz im Primärenergiebedarf gegenüber konventionellen Fahrzeugen hervorruft. Dazu tragen auch die stetigen Effizienzverbesserungen von Verbrennungsmotoren bei. Weitere Gründe sind die steigende Hybridisierung von konventionellen Fahrzeugen sowie die hohen Wirkungsgrade in den Vorketten von Benzin und Diesel.

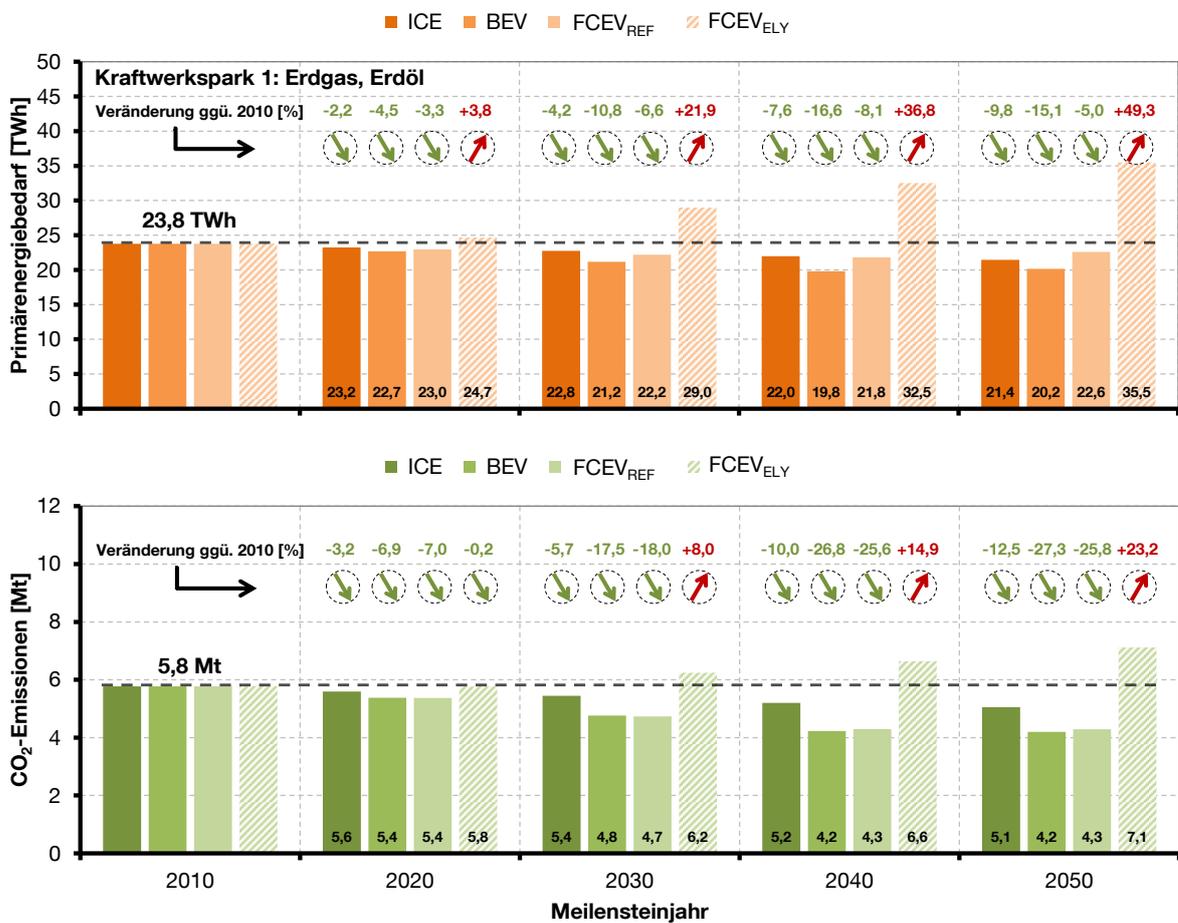


Abbildung 5.10: Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 1

Analog zur Situation des Primärenergiebedarfs sinken die im Verkehrssektor anfallenden CO₂-Emissionen mit Ausnahme im Szenario FCEV_{ELY} ab 2010 deutlich. Vor dem Hintergrund steigender Verkehrsleistung und wachsendem Passagieraufkommens in den nächsten Jahren in Singapur von 25 Mrd. Pkm im Jahr 2010 auf errechnete 40 Mrd. Pkm 2050 (+60 %) ist dieser Trend auf jeden Fall bemerkenswert.

Werden zukünftig weiterhin konventionelle Fahrzeuge in Singapur eingesetzt, ist mit einer Reduzierung der CO₂-Emissionen von 5,8 Mt im Jahr 2010 auf 5,1 Mt am Ende des Modellierungszeitraumes zu rechnen (-12,5 %). Wesentlich signifikantere Emissionsreduktionen können für den Einsatz von batterieelektrischen und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen (Wasserstoffgewinnung aus Dampfreformierung) bestimmt werden (2050: 4,2 Mt). Das beinahe identische Emissionsreduktionspotential dieser beiden Szenarien lässt sich auf die indirekte Abhängigkeit beider Antriebstechnologien vom Energieträger Erdgas zurückführen. Batterien (in Szenario BEV) weisen zwar gegenüber Brennstoffzellen höhere Effizienzen auf, diese werden jedoch durch geringere Wirkungsgrade von CCGT-Kraftwerken (Gas-Kraftwerke) im Vergleich zur Dampfreformierung kompensiert. Insgesamt wird das geringste CO₂-Reduktionspotential – wie auch schon in der Entwicklung des Primärenergiebedarfs festgestellt – bei Einsatz von auf Elektrolyse-Wasserstoff basierenden brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen erreicht.

Der verwendete Kraftwerkspark bestehend aus konventionellen Öl- und Gaskraftwerken zeigt, dass durch die Integration von Elektrofahrzeugen in den Verkehrsmix etwaige Effizienzverbesserungen und Steigerungsraten in der Emissionsreduktion stark limitiert sind. Langfristig gesehen würde nur die Einbindung von batterieelektrischen Fahrzeugen in Singapur deutliche Einsparungen gegenüber einer verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugflotte bewirken. Bei Dominanz von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV_{REF} und FCEV_{ELY}) ist sogar von einem höheren Energiebedarf auszugehen. Dies kann zwangsläufig zu einer ansteigenden Importabhängigkeit Singapurs von Erdgas führen. Werden BEV als dominante Antriebstechnologie betrachtet, sinken die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 auf 4,2 Mt und fallen somit 17 % geringer aus verglichen mit dem Einsatz herkömmlicher Fahrzeuge. Das Szenario FCEV_{REF} zeigt eine ähnliche Reduktion der Emissionen. Im Falle der Wasserstoffgewinnung durch Elektrolyse ist mit einem Anstieg der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor um 40 % auf 7,1 Mt gegenüber der Verwendung konventioneller Fahrzeuge im Jahr 2050 zu rechnen. Trotzdem ist die lokale Emissionsfreiheit sämtlicher innovativer Antriebstechnologien als gewichtiger Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen zu bewerten.

Ferner ist anzumerken, dass sich die zukünftige Dominanz von batterieelektrischen Fahrzeugen oder Brennstoffzellenfahrzeugen (Wasserstoff aus Elektrolyse) im Verkehrsmix Singapurs in einem gesteigerten Strombedarf von 9,1 TWh bzw. 18,6 TWh im Jahr 2050 äußert, im Vergleich zum Szenario mit herkömmlich betriebenen Fahrzeugen oder Brennstoffzellenfahrzeugen, die Wasserstoff aus Dampfreformierung

verwenden. Dieser Effekt spielt für die Integration neuer Erzeugungskapazitäten bis zu einem bestimmten Kapazitäts- oder Erzeugungslevel in den singapurischen Kraftwerkspark eine Rolle, da der gesteigerte Strombedarf zu unterschiedlichen spezifischen CO₂-Emissionen und Effizienzen für jedes Szenario führt.

Abbildung 5.11 spiegelt die zukünftige Situation bei Verwendung verschiedener Antriebstechnologien wider, wenn der existierende Kraftwerkspark um Photovoltaikkraftwerke (2050: 14 TWh aus PV-Anlagen) erweitert wird (KWP 2). Grundsätzlich kann damit für beinahe alle Zusammensetzungen des Verkehrssektors ein Rückgang des Primärenergiebedarfs festgestellt werden. Diese Reduktion ist der Tatsache geschuldet, dass Photovoltaikanlagen durch Solarstrahlung elektrische Energie erzeugen und somit keinem Import von Energieträgern bedürfen. Je weniger Import stattfinden muss und je mehr Elektrizität eine Fahrzeugflotte benötigt, desto höher fallen die Effizienzverbesserungen aus.

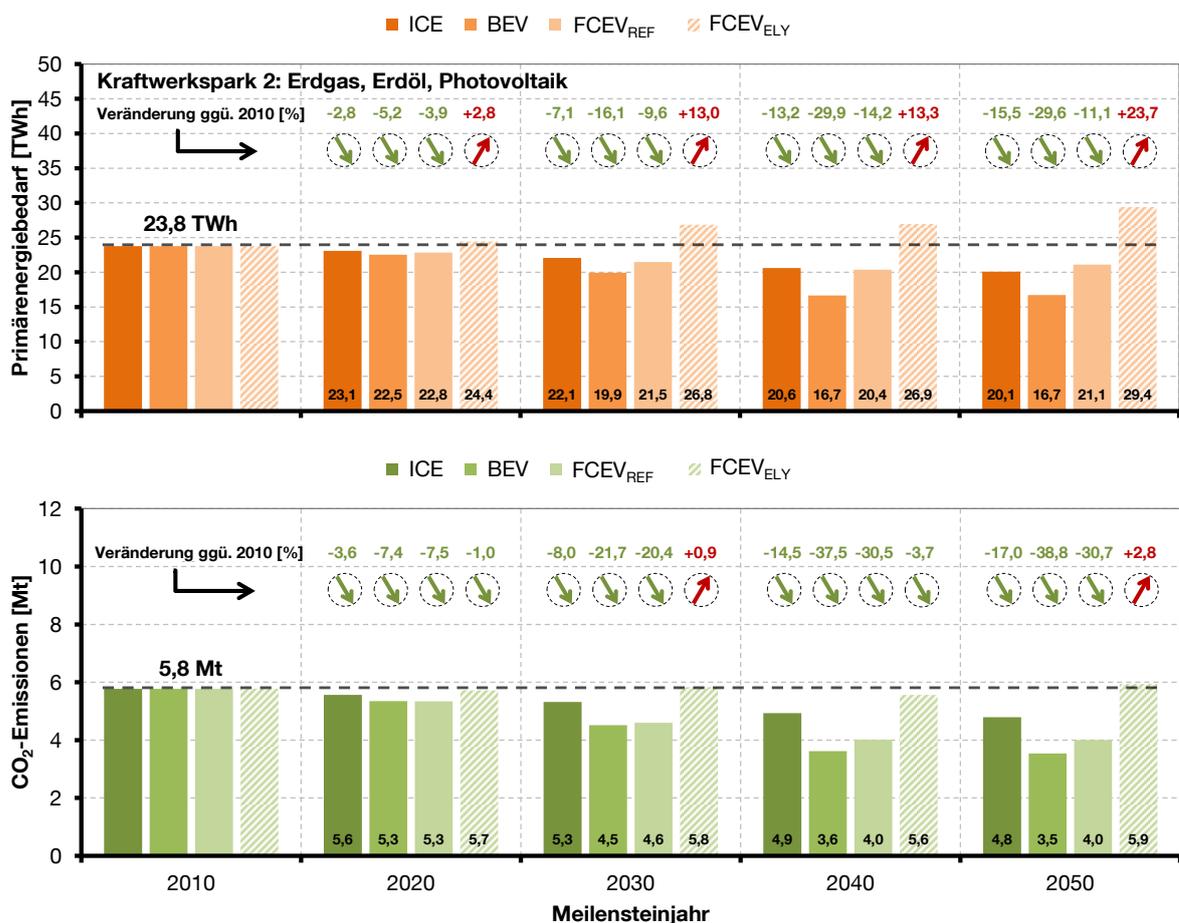


Abbildung 5.11: Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 2

Der Primärenergiebedarf im Szenario ICE erfährt im Jahr 2050 durch die Integration von Photovoltaikanlagen in den herkömmlichen Kraftwerkspark eine Senkung von 21,4 TWh (Abbildung 5.10) auf 20,1 TWh (Abbildung 5.11), während sich der Primärenergiebedarf bei Dominanz von batterieelektrischen Fahrzeugen von 20,2 TWh (Abbildung 5.10) auf 16,7 TWh (Abbildung 5.11) reduziert. Dies ist auf den hierbei größeren Anteil an Strom im Endenergiebedarf zurückzuführen. Demzufolge fallen gegenüber den Entwicklungen aus Abbildung 5.10 die Änderungen bei Dominanz von Brennstoffzellenfahrzeugen (Wasserstoff aus Dampfreformierung) und von konventionellen Fahrzeugen vergleichsweise gering aus. Die bedeutsamsten Effizienzverbesserungen gegenüber eines herkömmlichen Kraftwerksparks (Gas, Öl) können bei der dominanten Integration von brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen beobachtet werden, die ihren Wasserstoff aus Elektrolyse beziehen und damit den höchsten Elektrizitätsbedarf unter allen Verkehrsszenarien verursachen. Die zusätzliche Nutzung von PV zur Stromerzeugung ergibt einen um 17 % reduzierten Primärenergiebedarf im Verkehrssektor im Jahr 2050.

Durch die emissionsfreie solare Stromerzeugung kann in sämtlichen Verkehrsszenarien eine Reduzierung der Gesamtemissionen im Verkehrssektor erreicht werden. Analog zur Situation bei Stromerzeugung nur durch Öl- und Gaskraftwerke erreichen die CO₂-Emissionen bei zusätzlicher Stromerzeugung durch PV-Anlagen ein Minimum bei Dominanz der batterieelektrischen Antriebstechnologie, gefolgt von Brennstoffzellenfahrzeugen, deren benötigter Wasserstoff der Dampfreformierung entstammt, und der zukünftigen Verwendung von konventionellen Fahrzeugen. Die meisten Emissionen fallen im Szenario FCEV_{ELY} an. Trotzdem ist gegenüber einem rein fossil basierten Energiemix (Gas und Öl) ein Rückgang der CO₂-Emissionen um 17 % im Jahr 2050 zu verzeichnen. Ein gesteigerter Strombedarf geht also einher mit einem erhöhten Emissionsreduktionspotential.

Es bleibt festzuhalten, dass die Einbindung emissionsfreier Stromerzeugungstechnologien wie Photovoltaikanlagen einen signifikanten Rückgang sowohl im Primärenergiebedarf als auch in den CO₂-Emissionen für die Stromproduktion herbeiführt. Dieser Effekt hat vor allem einen großen Einfluss auf Antriebstechnologien, die eine vergleichsweise große Menge an elektrischer Energie beanspruchen. Die Attraktivität der Szenarien BEV und FCEV_{ELY} steigt dadurch. Die Simulationen ergeben, dass durch die verstärkte Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen (Szenario BEV) die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 um 27 % niedriger ausfallen als bei der Verwendung von herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen. Der Primärenergiebedarf fällt um 17 % niedriger aus. Der hohe elektrische Energiebedarf für die Elektrolyse

würde normalerweise weitere Verbesserungen im Szenario FCEV_{ELY} bedeuten. Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen fallen jedoch deutlich höher aus im Vergleich zu den verbleibenden Verkehrsszenarien. Da der Strombedarf nur einen kleinen Anteil am Endenergiebedarf dieser hier betrachteten Brennstoffzellenfahrzeuge (Wasserstoff aus Elektrolyse) ausmacht, halten sich die Änderungen im Energiebedarf und den Emissionen gegenüber der Situation in Abbildung 5.10 (Stromerzeugung aus Gas- und Ölkraftwerken) in Grenzen.

Die Effekte, die durch eine zusätzliche Integration von Kernkraftwerken (2050: 7 GW installierte Leistung) in den Stromerzeugungssektor von Singapur auf die Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen hervorgerufen werden (KWP 3), zeigt **Abbildung 5.12**.

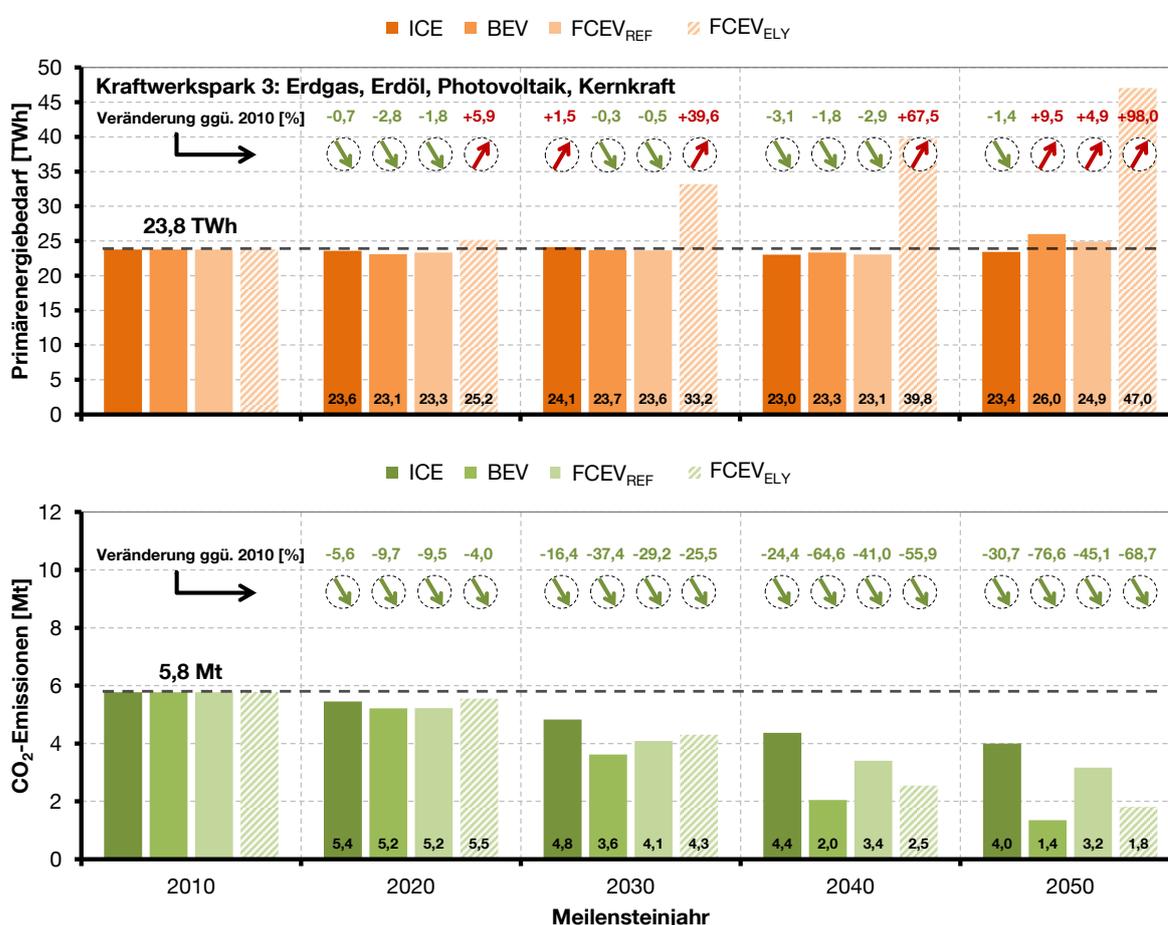


Abbildung 5.12: Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 3

Grundsätzlich ist nur mit sehr geringen Reduktionen im Primärenergiebedarf von maximal etwa 3,1 % gegenüber dem Startjahr 2010 zu rechnen. Im Jahr 2050 sind in nahezu allen Zusammensetzungen des Verkehrssektors deutliche Anstiege im

Energiebedarf festzustellen. Dies lässt sich auf geringere Wirkungsgrade von Kernkraftwerken im Vergleich zu Gaskraftwerken zurückführen. Wie bereits diskutiert, sind davon Antriebstechnologien stärker betroffen, die einen höheren Elektrizitätsbedarf besitzen. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass im Modelljahr 2050 unter Zugrundelegung eines Kraftwerksparks bestehend aus Gas-, Öl-, PV- und Kernkraftwerken ein von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen dominierter Verkehrsmix die energieeffizienteste Lösung darstellt. Im Vergleich zur Situation in Abbildung 5.11 (Energimix: Gas, Öl, PV) ist eine Steigerung des Primärenergiebedarfs von nur 16 % festzustellen, während der Primärenergiebedarf für die Szenarien BEV und FCEV_{ELY} um 56 % bzw. 60 % ansteigt. Dieser Anstieg steht in der Hauptsache mit dem Import von Uran zur Befuerung der Kernkraftwerke in Zusammenhang. Im Vergleich zum Kraftwerkspark bestehend aus Öl- und Gaskraftwerken kann jedoch die Importabhängigkeit von Gas aus benachbarten Staaten um 75 % reduziert werden.

Wie Abbildung 5.12 entnommen werden kann, führt die Verwendung von Kernkraftwerken zur Stromerzeugung zu signifikanten Veränderungen (Reduktionen) in den CO₂-Emissionen im Verkehrssektor für alle Zusammensetzungen des Verkehrsmixes. Insbesondere die verstärkte Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen mit Elektrolyse-Wasserstoff lassen eine Senkung der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 um 77 % bzw. 69 % gegenüber dem Status Quo aus dem Jahre 2010 zu. Antriebstechnologien, die hauptsächlich durch die Verwendung von fossilen Kraftstoffen charakterisiert sind, sind nicht in der Lage, die Treibhausgasemissionen dermaßen signifikant zu verringern. Festzustellen ist, dass mit zunehmendem Anteil emissionsfreier bzw. emissionsarmer Elektrizitätserzeugung innovative Antriebstechnologien (direkte (BEV) oder indirekte Versorgung mit Strom (FCEV_{ELY})) in Singapur immer attraktiver werden und CO₂-Emissionen bedeutsam verringern können. Auf fossilen Kraftstoffen basierende Fahrzeuge haben in diesem Fall das Nachsehen.

In einem letzten Szenario (**Abbildung 5.13**) wird der aus Öl-, Gas- und PV-Kraftwerken bestehende Kraftwerksmix einer Erweiterung durch Kohlekraftwerke (2050: 7 GW installierte Leistung) unterzogen und erneut die Frage beantwortet, welche Auswirkungen dies unter Berücksichtigung unterschiedlicher Antriebstechnologien auf die Entwicklung von Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen im Verkehrssektor hätte (KWP 4).

Ähnlich der Situation bei zusätzlicher Verwendung von Kernkraftwerken ist auch hier gegenüber Abbildung 5.11 (Integration von PV) ein Anstieg im Primärenergiebedarf

zu beobachten. Zurückführen lässt sich dies auf geringere Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken im Vergleich zu Gaskraftwerken. Nichtsdestotrotz bleibt das Szenario BEV das effizienteste in Bezug auf den Primärenergiebedarf, gefolgt von den Szenarien ICE und FCEV_{REF}. Der meisten Primärenergie bedarf es, werden Brennstoffzellenfahrzeuge mit Elektrolyse-Wasserstoff als dominante Fahrzeugkategorie eingesetzt.

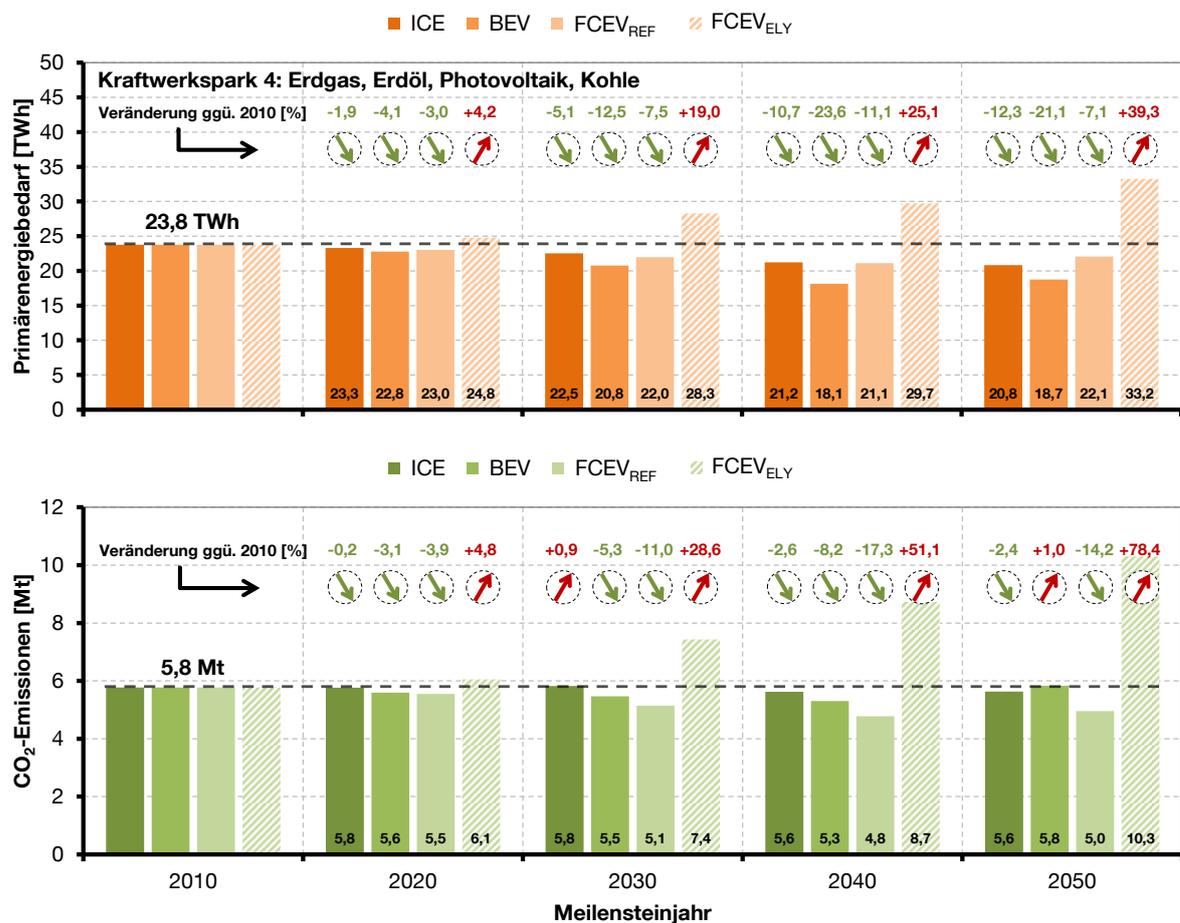


Abbildung 5.13: Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 4

Der Vergleich aller untersuchten Energieinfrastrukturen (Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.13) zeigt, dass die Einführung von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung die größte Menge an CO₂-Emissionen im Verkehrssektor verursacht. Insgesamt zeigt das Szenario FCEV_{REF} die geringsten Treibhausgasemissionen. Bis zum Jahr 2040 folgt das Szenario BEV an zweiter Stelle, bis es 2050 vom Szenario für konventionelle Fahrzeuge abgelöst wird. Mehr Kapazität an Kohlekraftwerken verursacht in den späteren Modelljahren eine größere Menge an Treibhausgasemissionen. Die Dominanz von Brennstoffzellenfahrzeugen, deren Wasserstoff durch Elektrolyse gewon-

nen wird, führt 2050 zu mehr als doppelt so hohen Emissionen verglichen mit auf Dampfreformierung basierenden brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen (hoher Bedarf an Elektrizität zur Wasserstoffproduktion).

Für Singapur sind die spezifischen Emissionen basierend auf dem derzeitigen Strommix (die singapurische Stromproduktion ist vorwiegend charakterisiert durch Gas- und Ölkraftwerke) für Elektrofahrzeuge in **Abbildung 5.14** ermittelt worden (weiterführende Analysen siehe [124]). Zusätzlich sind die spezifischen Emissionen weiterer Antriebstechnologien in die Abbildung mit aufgenommen. Grundsätzlich hängen die ermittelten Ergebnisse natürlich stets von der Wahl der Fahrzeuge und deren Verbräuchen ab. Zur Ermittlung dieser Zahlen wurden typische, mittlere Endenergieverbräuche für die entsprechenden Antriebstechnologien angenommen.

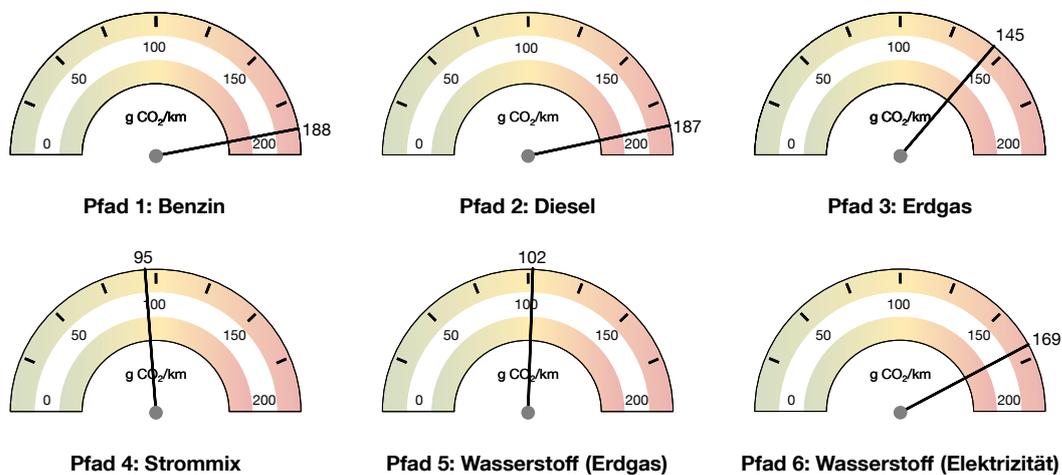


Abbildung 5.14: Spezifische CO₂-Emissionen pro km in unterschiedlichen Pfaden und Antriebstechnologien am Beispiel Singapur

Pro km ergeben sich für ein Elektrofahrzeug bei einem Verbrauch von 20 kWh/100 km und einem spezifischen Emissionsfaktor von ca. 496 g/kWh_{el} im Strommix derzeit etwa 95 g CO₂. Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeuge liegen deutlich darüber. Obwohl bei Betrachtung der Well-to-Tank-Emissionen (bei Umwandlung von Primärenergie in Endenergie) ein verhältnismäßig hoher Wert durch die Verlagerung der Emissionen vom Verkehrssektor in den Kraftwerkssektor zustande kommt, haben Elektrofahrzeuge den Vorteil, von der steten Verbesserung von Kraftwerken und der Erhöhung von Effizienzen im Stromerzeugungssektor zu profitieren. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien am Strommix eines Landes nehmen automatisch die spezifischen Emissionen und damit auch die Kosten für das Laden eines Elektrofahrzeuges ab.

Obige Ausführungen hatten die Entwicklungen im Verkehrssektor zum Inhalt. Doch die Wahl des Kraftwerksparkes und der dominanten Antriebstechnologie hat ebenfalls Einfluss auf den Gesamtenergiesektor in Singapur. Zusammenfassend gibt **Abbildung 5.15** einen Überblick über die Ergebnisse für Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen in sämtlichen Kombinationen aus Kraftwerks- und Verkehrszusammensetzungen in der Zeitreihe 2010 bis 2050. Zusätzlich wird der Einfluss der gewählten Rahmenbedingungen für die Stromerzeugung auf die Importabhängigkeit Singapurs deutlich.

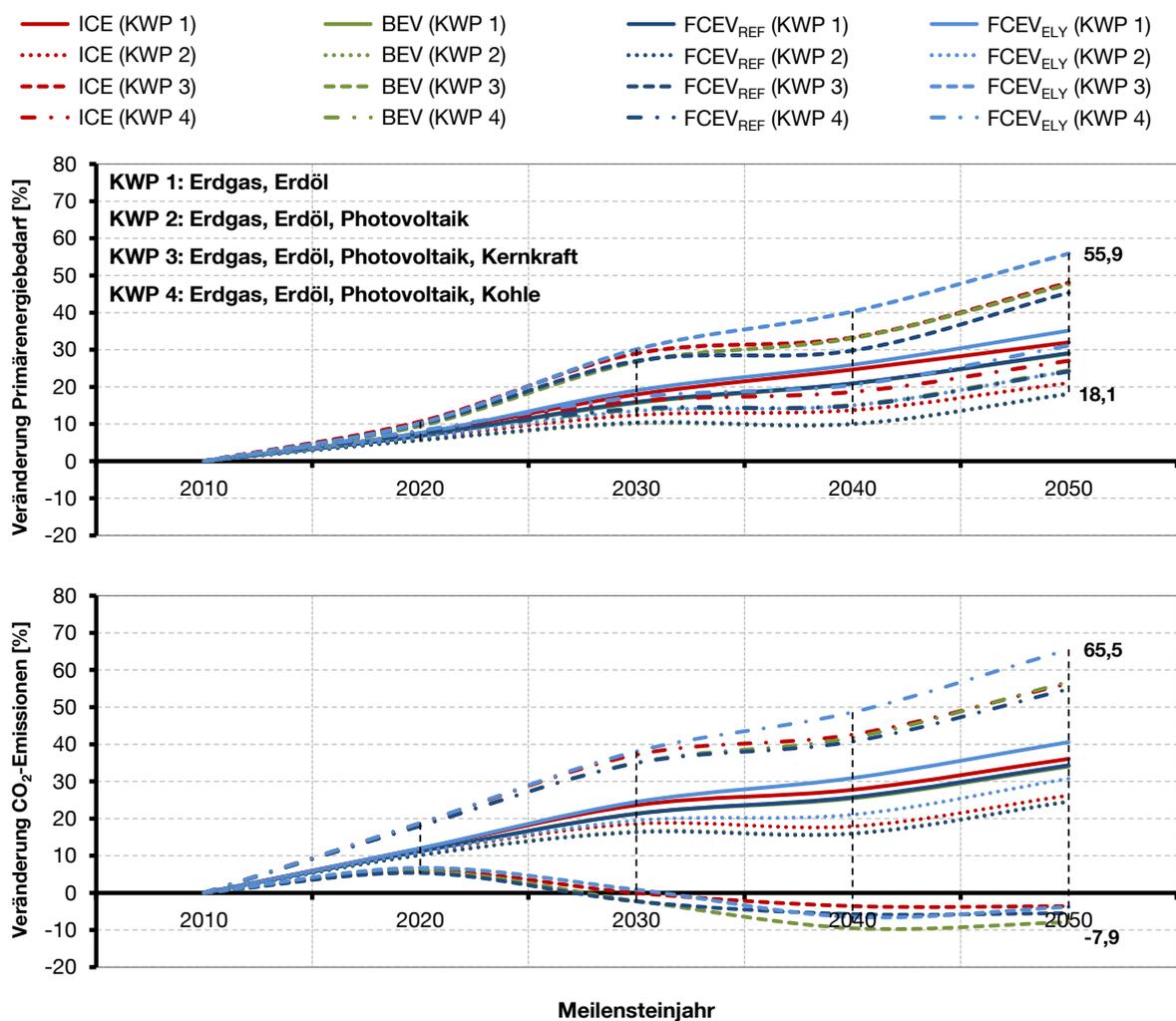


Abbildung 5.15: Prozentuale Veränderung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen unterschiedlicher Szenarien gegenüber dem Basisjahr 2010 im Gesamtenergiesektor in Singapur

Eine Integration von Photovoltaik in Singapur führt grundsätzlich zu signifikanten Reduktionen im Primärenergiebedarf und in den CO₂-Emissionen. Das langfristig angepeilte Ziel von nur 14 TWh Stromerzeugung durch PV kann die Problematik einer anhaltenden Importabhängigkeit von Erdgas nicht auf Dauer mindern. Weitere

alternative Erzeugungstechnologien können dazu aber einen weiteren entscheidenden Beitrag liefern.

Wie aus obiger Abbildung 5.15 hervorgeht, könnten in ganz Singapur durch die Integration von Kernkraftwerken die CO₂-Emissionen nochmals deutlich verringert werden. Der Primärenergiebedarf nimmt in diesem Szenario jedoch sehr hohe Werte an (geringere Wirkungsgrade im Vergleich zu Gaskraftwerken), die Importabhängigkeit von Erdgas verringert sich. Auch die Verwendung von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung treibt den Primärenergiebedarf in die Höhe, genauso wie die Treibhausgasemissionen aufgrund hoher spezifischer Emissionsfaktoren von Kohle. Zu beobachten ist, dass die Einflüsse durch die Wahl der dominanten Antriebstechnologie im Vergleich zu den Einflüssen durch die Wahl des Kraftwerksparks limitiert sind. Dies ist hauptsächlich dem vergleichsweise geringen Anteil des Verkehrssektors am Gesamtenergiebedarf in Singapur geschuldet (2010: Primärenergiebedarf Verkehrssektor 24 TWh, Primärenergiebedarf gesamt 211 TWh).

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Singapurs Primärenergiebedarf wird sich grundsätzlich gegenüber 2010 aufgrund des steigenden Bedarfs im Industriesektor und des prognostizierten wirtschaftlichen Wachstums bis 2050 weiter erhöhen. Gleichzeitig werden Importabhängigkeiten durch Effizienzverbesserungen in der Zukunft und Diversifizierung des Energiemixes abnehmen. Einzig die Integration von Kernkraftwerken könnte langfristig die CO₂-Emissionen in Singapur reduzieren. Der Einfluss der gewählten Antriebstechnologie ist hier jedoch als vergleichsweise gering einzustufen. Die Beurteilung der Auswirkungen der Integration von Elektrofahrzeugen in Singapur kann nur im Kontext des Gesamtenergiesystems erfolgen. Die Gesamteffizienz von Elektrofahrzeugen ist dabei in hohem Maße von der Stromproduktion und der Art und Weise, wie Endenergie zustande kommt, abhängig. Mit Ausnahme von Photovoltaik ist das Potential erneuerbarer Energien verhältnismäßig gering.

5.2 Städtische Strukturen

Für den Bereich der städtischen Strukturen, die gegenüber der Megastadt Singapur von einer deutlich geringeren Bevölkerungsdichte charakterisiert sind, stehen die beiden Städte Frankfurt am Main und Ingolstadt. Diese werden im Folgenden analysiert.

5.2.1 Frankfurt am Main

Zunächst liegt der Fokus auf der Stadt Frankfurt am Main, die in vielerlei Hinsicht als bedeutende Stadt in Deutschland und Europa bezeichnet werden kann und gleichzeitig als internationaler Hub agiert. Durch Spezialisierungseffekte vor allen Dingen im Finanz-, Banken- und Dienstleistungsbereich ist Frankfurt in internationale Beziehungen eingebunden. Hubeffekte sind zudem auch im Verkehrsbereich festzustellen.

5.2.1.1 Verkehrs- und Parkraumstruktur

Zu Beginn der Diskussion der Verkehrs- und Parkraumstruktur in Frankfurt am Main sind die wesentlichen Mobilitätskenngrößen zu bestimmen. Ein wichtiger Hinweis auf das Mobilitätsverhalten ist der Anteil der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen (Modal Split).

Die Darstellung in **Abbildung 5.16** gibt Aufschluss über die prozentuale Verteilung der Wege, durchgeführt mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln in Frankfurt.

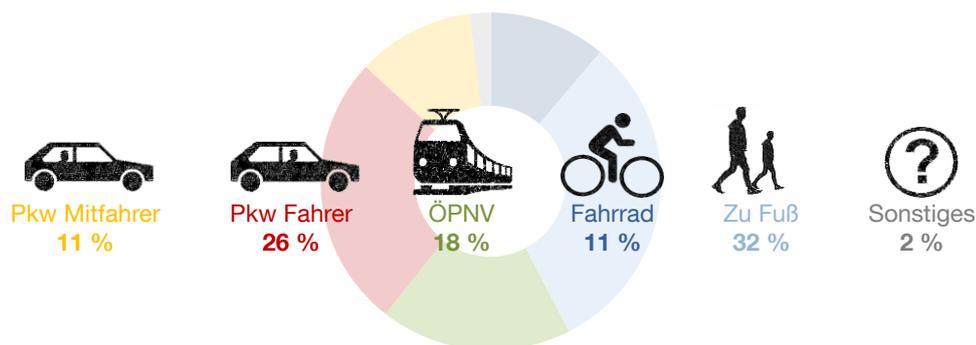


Abbildung 5.16: Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Frankfurt am Main (Daten: [75, 125])

Der motorisierte Individualverkehr (Pkw) kommt dabei insgesamt auf 37 % Anteil an den Gesamtwegen, gefolgt vom öffentlichen Personenverkehr mit 18 %. Neben 11 % Fahrradwegen wird in der Kernstadt Frankfurt mehr als jeder dritte Weg zu Fuß zurückgelegt. Innerhalb der Metropolregion um Frankfurt wird dagegen mehr als die Hälfte aller Wege mit dem Pkw durchgeführt. Der geringere Anteil in Frankfurt resultiert in gestärkten Anteilen für ÖPNV-Wege und Fußwege. [125]

Bei Betrachtung der Anteile der Wegezwecke am Verkehrsaufkommen in Frankfurt am Main zeigt sich eine Situation, wie sie in **Abbildung 5.17** linkerhand dargestellt ist.

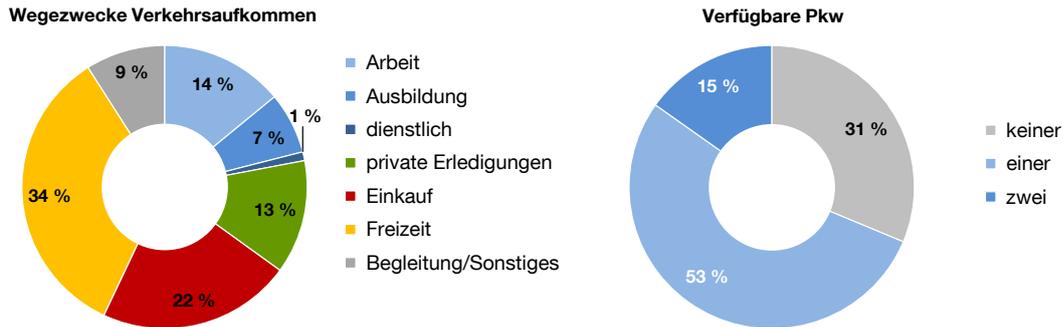


Abbildung 5.17: Anteile der Wegezwecke am Verkehrsaufkommen (links) sowie die Anzahl der in Haushalten verfügbaren Pkw (rechts) (Daten: [75, 125])

Es ist festzuhalten, dass den Wegen, die von den Einwohnern Frankfurts zum Zwecke der Freizeit durchgeführt werden, eine hohe Bedeutung zukommt. Diese bilden den größten Anteil an den Gesamtwegen, gefolgt von Einkaufswegen. Bemerkenswert ist, dass die Anteile für Wege zum Zwecke der Arbeit oder der Ausbildung vergleichsweise gering ausfallen. Insgesamt werden mehr als drei Viertel der Wege zu anderen Zwecken durchgeführt. Im Mittel legt jeder Frankfurter Bürger täglich 3,4 Wege zurück [125].

Das rechte Diagramm in Abbildung 5.17 gibt die Anzahl der verfügbaren Pkw in den Frankfurter Haushalten an. Knapp ein Drittel der Haushalte besitzt demnach keinen Pkw und kann seine täglichen Wege durch Nutzung anderer Verkehrsmittel abdecken. Ein im Allgemeinen gut ausgebautes ÖPNV-Netz in Städten macht den Verzicht auf den eigenen Pkw attraktiver. 53 % der Haushalte können auf einen Pkw zurückgreifen, während 15 % zwei Pkw in Besitz haben. Innerhalb der Metropolregion sind aber entscheidende Unterschiede in der Pkw-Verfügbarkeit zu sehen. In den kleineren Umlandgemeinden mit deutlich niedrigeren Einwohnerdichten steigt die Anzahl der Haushalte, die über mindestens einen Pkw verfügen, auf 90 % an [125]. Eine steigende Abhängigkeit vom Pkw mit abnehmender Bevölkerungsdichte wird im späteren Verlauf der Arbeit bei Untersuchung der ländlichen Gemeinde Schöllnach nochmal deutlich.

Abbildung 5.18 zeigt differenziert nach Weglängen den Anteil an den Gesamtwegen. Es wird deutlich, dass 96 % aller Wege kürzer als 50 km sind und nur eine sehr geringe Anzahl an Wegen mit deutlich höheren Distanzen durchgeführt werden. Zwei Drittel aller Wege in Frankfurt am Main sind sogar kürzer als 5 km.

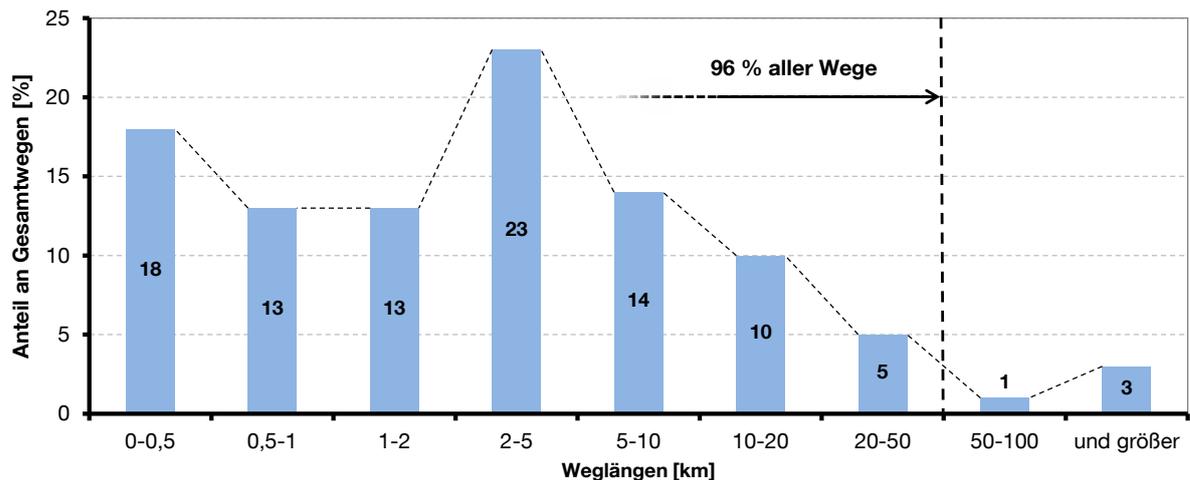


Abbildung 5.18: Verteilung der Weglängen in Frankfurt am Main (Daten: [75, 125])

In Frankfurt sind derzeit 319.123 Pkw zugelassen [99]. Ob alle zugelassenen Fahrzeuge auch regelmäßig im Stadtgebiet bewegt und geparkt werden, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Es ist anzunehmen, dass ein kleiner Teil (z. B. gewerblich genutzte Fahrzeuge oder Firmenfahrzeuge) nicht dauerhaft innerhalb des Stadtgebietes betrieben wird. Dennoch werden alle zugelassenen Pkw der Stadt Frankfurt als verfügbar zugeordnet. Hinzu kommen zusätzlich Pkw der nach Frankfurt pendelnden Beschäftigten.

Analog zu Singapur sind die unterschiedlichen Möglichkeiten der Fahrzeugunterbringung – zunächst unabhängig von der jeweiligen Antriebstechnologie – auf dem Stadtgebiet Frankfurts am Main zu bewerten und zu diskutieren, um später mögliche grundlegende Strukturen einer Ladeinfrastruktur für dieses städtische Gebiet identifizieren zu können. In den folgenden Ausführungen wird die Situation in Frankfurt am Main anhand der theoretisch verfügbaren Parkstände und Stellplätze analysiert und bewertet. Im Vergleich zu Singapur sind in deutschen Städten auch verstärkt Parkmöglichkeiten am Straßenrand zu berücksichtigen.

Wie **Abbildung 5.19** exemplarisch zeigt, sind die Frankfurter Stadtteile von stark unterschiedlichen Strukturen charakterisiert.

Sind im ländlichen Frankfurt neben dem Straßenparken vorwiegend Einzel- und Doppelgaragen zur Unterbringung von Fahrzeugen existent, ist das Mittel der Wahl im innerstädtischen Bereich neben Parkmöglichkeiten auf der Straße das Parkhaus, die Tiefgarage oder große Parkplätze. Weniger dicht besiedelte Gebiete innerhalb Frankfurts können infolgedessen als privat strukturiert bezeichnet werden. In den

dicht besiedelten Gebieten hingegen sind öffentliche und halböffentliche Parkmöglichkeiten prägend. In Frankfurt kommt aber in jedem Fall auch dem Parken auf öffentlichen Straßen eine große Bedeutung zu.



Abbildung 5.19: Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen im ländlichen (Harheim, links) sowie in Parkgebäuden und Parkplätzen im städtischen Frankfurt (Stadtkern/Bahnhofsviertel, rechts) (Datengrundlage: [126])

Der Methodenbeschreibung zur Ermittlung von Pkw-Stellplätzen und Parkständen und des Einflusses von öffentlichen Parkeinrichtungen und privaten Stellplätzen auf das Straßenparken folgend (Kapitel 4.1), ergeben sich für die Stadt Frankfurt unten nachfolgende Abbildungen (Abbildung 5.20 bis Abbildung 5.23).

Das in **Abbildung 5.20** dargestellte Raster in 200 x 200 m-Auflösung spiegelt die Bevölkerungsdichte im Stadtgebiet wider.

Deutlich treten dabei mit einer hohen Bevölkerungsdichte die innerstädtischen Stadtteile wie Gallus, Bockenheim, Nordend-West, Nordend-Ost oder Bornheim in Erscheinung. Grundsätzlich ist wie erwartet eine Verminderung der gerasterten Bevölkerungsdichte ausgehend vom Stadtzentrum hin zu den ländlich geprägten Stadtteilen festzustellen, wo die Bevölkerungsdichte bis etwa 460 Personen pro

Rasterzelle beträgt. Insgesamt kann eine Gesamtbevölkerung von 700.000 Personen ermittelt werden.

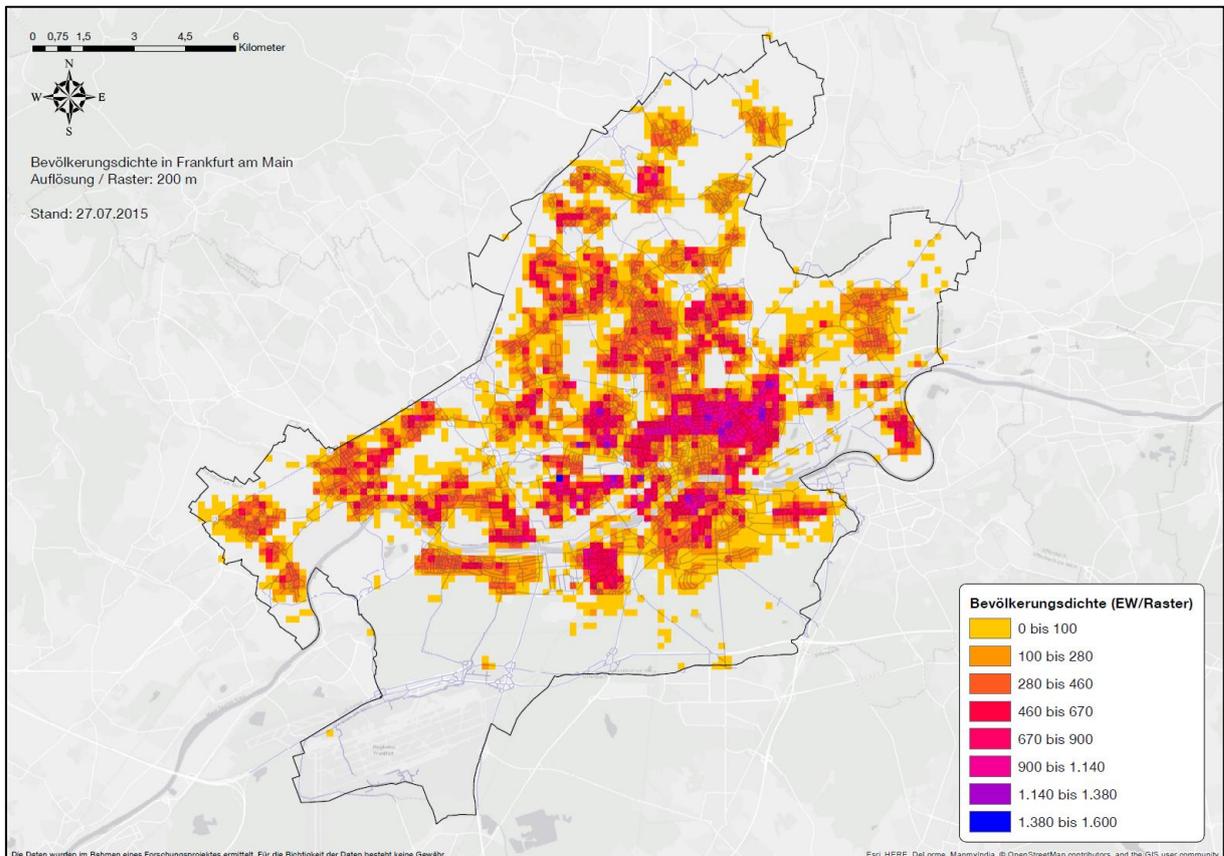


Abbildung 5.20: Bevölkerungsdichte in Frankfurt am Main mit einer Auflösung von 200 m (Datengrundlage: [126])

Die Verteilung der Bevölkerung innerhalb des Stadtgebietes steht in direktem Zusammenhang mit der Pkw-Dichte, wie sie für Frankfurt am Main in **Abbildung 5.21** in 100 x 100 m-Auflösung visualisiert ist.

Ein lageabhängiger Motorisierungsgrad für Pkw lässt ein deutlich ausgeprägtes Übergewicht der für Frankfurt ermittelten Pkw in den innerstädtischen Gebieten rund um die Altstadt erkennen. Prinzipiell kann von einem höheren Motorisierungsgrad in Randbezirken im Vergleich zu innerstädtischen Gebieten ausgegangen werden. Die Situation in Frankfurt zeigt, dass vor allen Dingen durch die hohe Bevölkerungsdichte im Stadtzentrum die Pkw-Dichten dort sehr hoch ausfallen. Die Methodik fördert eine Summe für die gesamte Stadt von etwa 320.000 Pkw zutage. Dabei handelt es sich um die der Stadt Frankfurt zugeordneten und dort zugelassenen Fahrzeuge. Welcher Anteil davon z. B. an anderen Stand-/Wohnorten genutzt wird, kann nicht bestimmt werden.

Mit der Kenntnis über die Anzahl der zugelassenen Pkw und deren räumlichen Verteilung innerhalb des Stadtgebietes kann in einem weiteren Schritt die Möglichkeit der Unterbringung der ermittelten Pkw (ohne potentielle Pendler von außen) auf den Frankfurter Straßen untersucht werden.

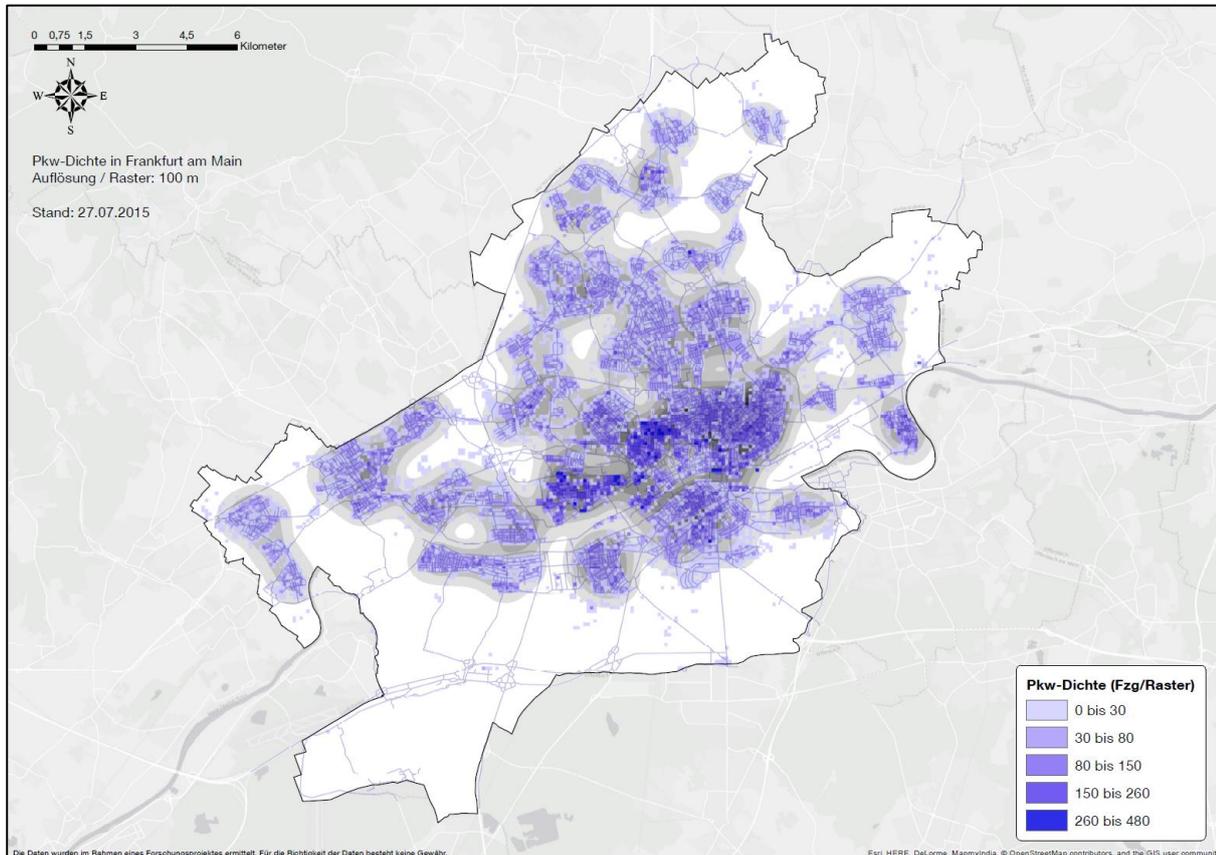


Abbildung 5.21: Pkw-Dichte in Frankfurt am Main mit einer Auflösung von 100 m (Datengrundlage: [126])

Unter Einbeziehung von Daten zum Straßennetz aus OpenStreetMap und Anwendung der in Kapitel 4.1 beschriebenen Methodik ergibt sich eine potentielle Belastung der Straßen allein durch Straßenparken aller Frankfurter Pkw (**Abbildung 5.22**).

Die Grafik gibt Aufschluss darüber, ob ein Straßenabschnitt zum Parken aller dort anzutreffenden Pkw theoretisch ausreichen würde oder nicht, wobei die Liniendicke des Straßensegmentes die Höhe des Parkplatzüberschusses bzw. des Parkplatzdefizites repräsentiert. Zu beachten ist hier, dass keine Berücksichtigung von Stellplätzen in Privatgaragen oder größeren Parkhäusern und Tiefgaragen stattfindet. Insgesamt zeigen sich vor allem in Arealen der Innenstadt Hotspots, wo die Parkkapazität der entsprechenden Straßenabschnitte theoretisch ungenügend ist. Dies lässt sich auf die dort hohe Anzahl zugelassener Pkw zurückführen. Gerade in den Stadtteilen Gallus und Westend-Süd ist mit erheblichen Parkplatzdefiziten zu rechnen. Erwar-

tungsgemäß ist das Problem der fehlenden Parkstände auf öffentlichen Straßen in den dünner besiedelten Stadtteilen am Stadtrand weniger stark ausgeprägt.

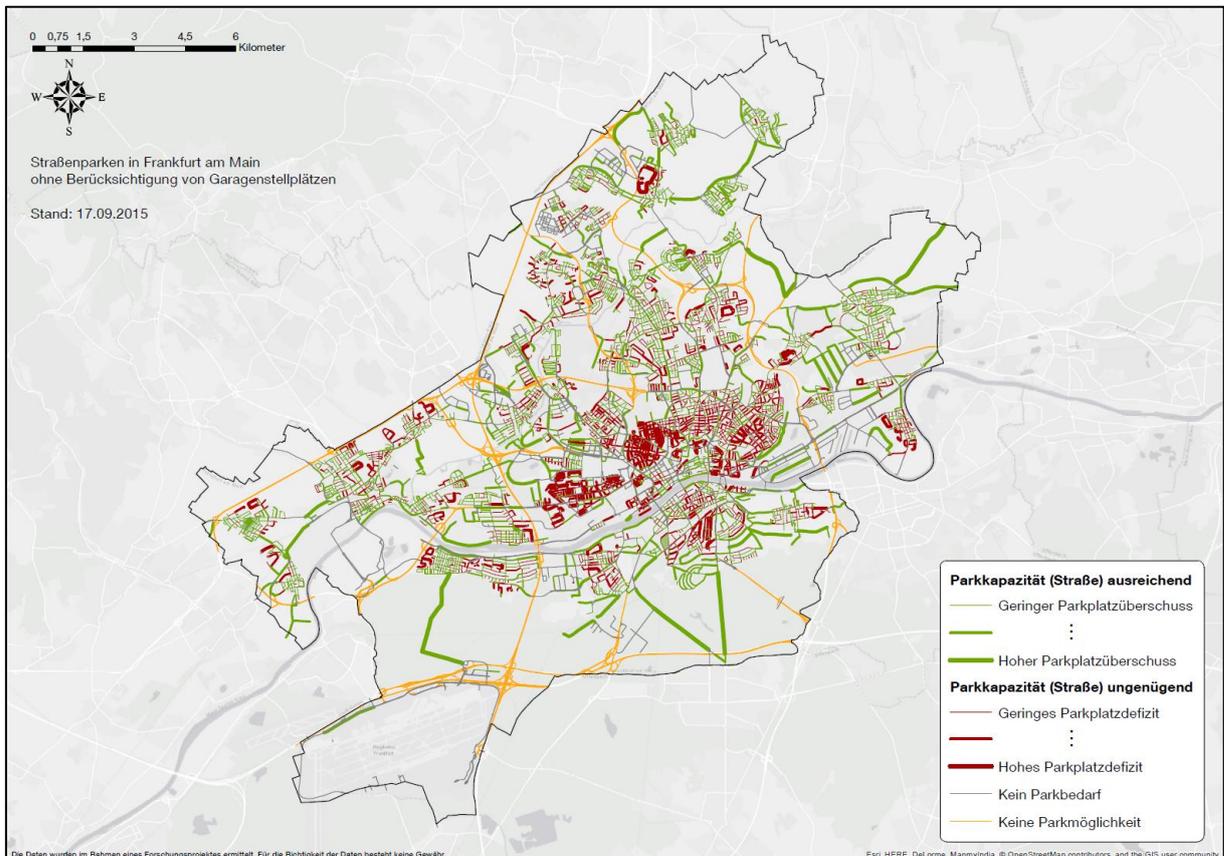


Abbildung 5.22: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Frankfurt am Main ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [126], OpenStreetMap)

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die zeitliche Dimension bei diesen Betrachtungen ebenfalls eine entscheidende Rolle spielt, hier aber unberücksichtigt bleibt. Durch Fluktuation bei der Nutzung von Parkständen (z. B. durch Auspendler, Einpendler und dem allgemeinen Verhalten der Fahrzeugnutzer) fällt die Situation des Straßenparkens veränderlich aus. Die maximale Anzahl der ermittelten Pkw pro Straßensegment wird somit nicht ganztäglich auf eine Parkmöglichkeit auf öffentlichen Straßen angewiesen sein. Einzelne Parkstände entlang der Straße sind dadurch mehrfach nutzbar. Dennoch bieten diese statischen Überlegungen Anhaltspunkte für das Verständnis der Strukturen des Parkens innerhalb des Stadtgebietes und der Rolle des Straßenparkens im Vergleich zur Parkgarage.

Da die Annahme der ausschließlichen Unterbringung von Pkw auf öffentlichen Straßen in Frankfurt am Main im Allgemeinen nicht der Realität entspricht, sind die zur Verfügung stehenden Stellplätze in privaten Garagen sowie in halböffentlichen und

öffentlichen Parkplätzen, Tiefgaragen und Parkhäusern zusätzlich zu berücksichtigen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Fahrzeugnutzer, die in Besitz einer privaten Garage oder eines privaten Stellplatzes in der Nähe ihrer Wohnung oder ihres Wohnhauses sind, diese Möglichkeiten auch primär zur Unterbringung ihres Pkw nutzen. Diese Stellplätze sind einem Fahrzeug exklusiv zugeordnet. Aus diesem Grund werden private Unterbringungsmöglichkeiten prioritär behandelt und den Abstellmöglichkeiten auf der Straße vorgezogen. Ferner wird unterstellt, dass sich die Nutzung von halböffentlichen und öffentlichen Tiefgaragen und Parkhäusern positiv auf die Parkplatzsituation in den Stadtteilen auswirkt und von den ermittelten Pkw zuerst angefahren werden. Die Kapazität eines Parkhauses oder einer Tiefgarage wird dafür räumlich gleichmäßig über den Stadtteil verteilt, in dem sich die Unterbringungsmöglichkeit befindet.

Wie sich nach der Berücksichtigung von privaten, halböffentlichen und öffentlichen Abstellmöglichkeiten in Garagen die Situation des Straßenparkens darstellen würde, kann **Abbildung 5.23** entnommen werden.

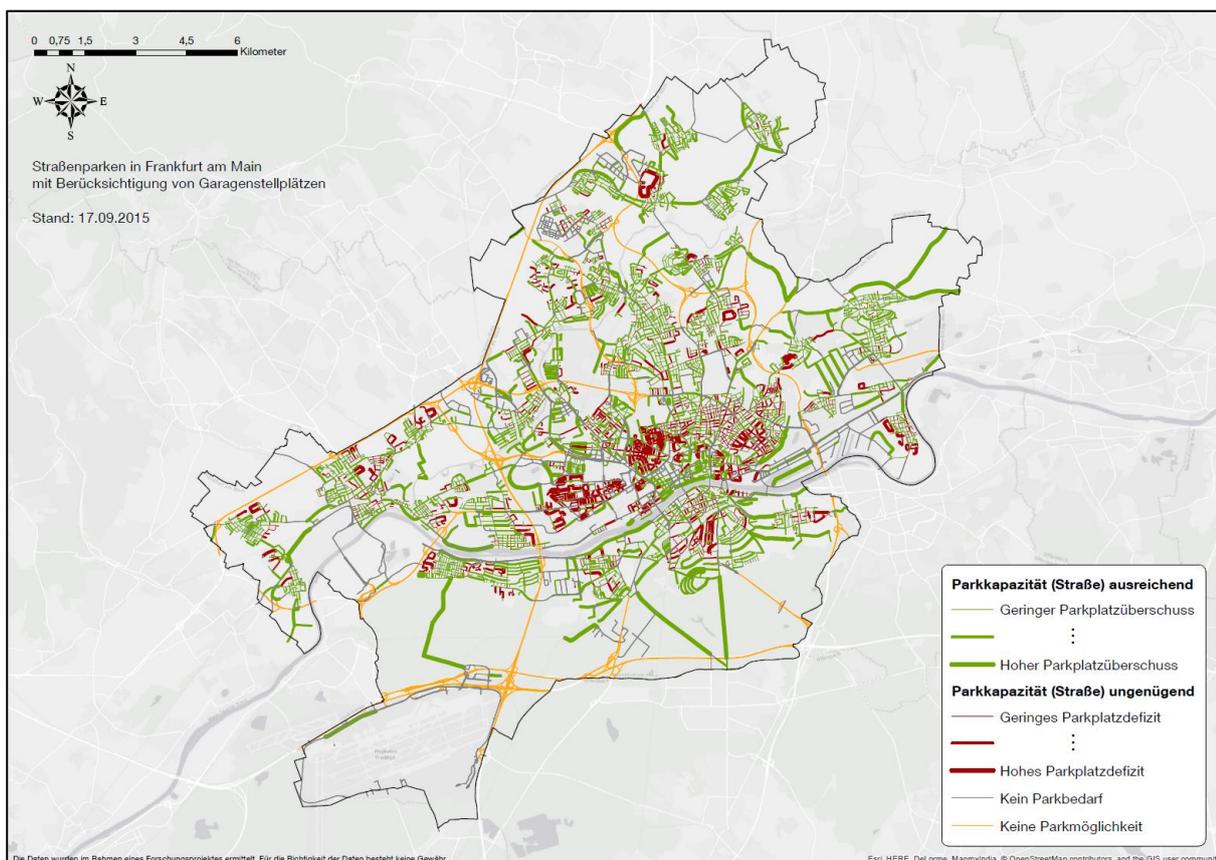


Abbildung 5.23: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Frankfurt am Main unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Daten: [126], OpenStreetMap)

Grundsätzlich ist ein Einfluss von großen Parkeinrichtungen in der Frankfurter Innenstadt auf die Parkstände auf der Straße zu beobachten. Werden alle verfügbaren Tiefgaragenstellplätze genutzt, verringert sich das Parkplatzdefizit im innerstädtischen Bereich klar. Verbesserungen sind auch an den Stadträndern durch die Nutzung von privaten Einzel- und Doppelgaragen festzustellen. In Stadtvierteln, die sowohl mit einer hohen Bevölkerungs- als auch einer hohen Pkw-Dichte aufwarten, ist weiterhin ein hohes Defizit beim Straßenparken gegeben. Natürlich muss berücksichtigt werden, dass große Parkplätze, öffentliche Parkhäuser und Parkstände entlang Straßen vermutlich vorwiegend von Berufseinpendlern nach Frankfurt genutzt werden müssen und nicht ausschließlich in Frankfurt ansässigen Pkw-Nutzern zur Verfügung stehen.

Zur Beurteilung der Parkraumstruktur in Frankfurt am Main sowie zur späteren Ableitung von Aussagen hinsichtlich einer möglichen Ausgestaltung von sinnvollen Ladefrastrukturen für dieses Fallbeispiel fasst **Abbildung 5.24** die durchgeführte Bestandsanalyse für Pkw-Stellplätze und Parkstände auf dem Stadtgebiet zusammen.

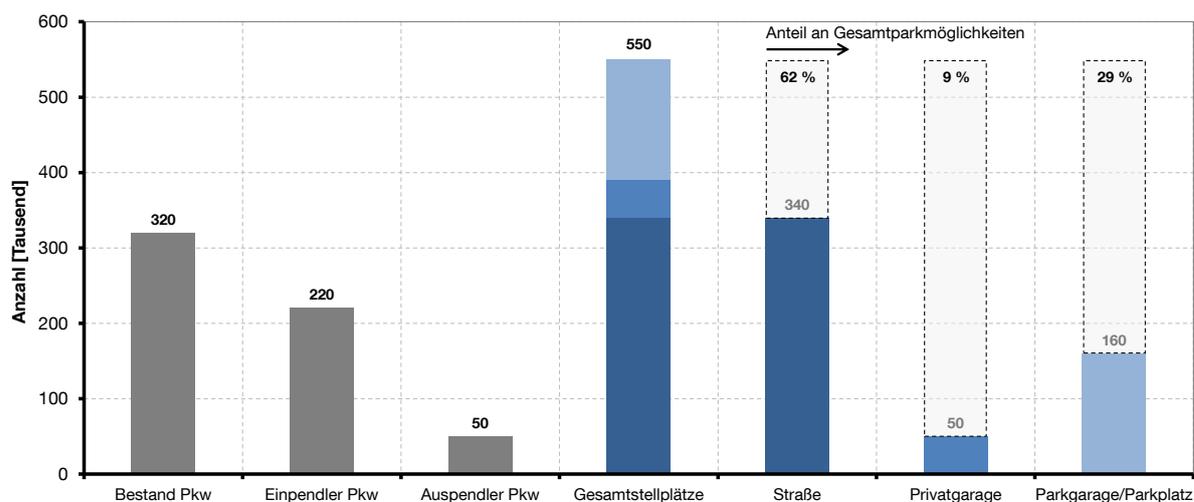


Abbildung 5.24: Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Frankfurt am Main

Insgesamt werden für die Stadt Frankfurt am Main basierend auf der Gebäudestruktur etwa 320.000 Pkw ermittelt. Dies entspricht den Zahlen der Zulassungsstatistik. Wird für die täglichen Berufseinpendler und Berufsauspendler eine Quote für die Pkw-Nutzung von etwa 66 % angenommen [127], sind zusätzlich ca. 220.000 Einpendler-Pkw sowie 50.000 Auspendler-Pkw zu berücksichtigen. Während des Tages ist anzunehmen, dass sich eine wesentlich größere Anzahl an Pkw innerhalb des Stadtgebietes aufhält (Bestand - Auspendler + Einpendler) als während der Abend- und Nachtstunden (Bestand).

Der Anzahl an ermittelten Pkw steht eine theoretische Anzahl an Parkständen und Stellplätzen von 550.000 gegenüber. Diese teilen sich auf in 340.000 Parkstände auf öffentlichen Straßen, 50.000 Einzelgaragenstellplätze sowie 160.000 Unterbringungsmöglichkeiten in Parkgaragen und großen Parkplätzen. Private Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen belaufen sich auf lediglich 9 %. Der Großteil aller Möglichkeiten zeigt halböffentlichen oder öffentlichen Charakter. Dies weist darauf hin, dass in Frankfurt am Main die Parkgarage im Vergleich zum Straßenparken eine vergleichsweise hohe Stellung einnimmt.

5.2.1.2 Energieinfrastruktur und Strombereitstellung

Neben der Untersuchung potentieller Standorte zum Parken und damit Laden von Elektrofahrzeugen in Frankfurt am Main ist auch hier die Frage zu beantworten, wie der Ladestrom in dieser Region bereitgestellt werden kann und die Energieinfrastruktur grundsätzlich gestaltet ist. Dabei soll auch deutlich werden, welche Möglichkeiten der Energieerzeugung und Energienutzung im zukünftigen Energiesystem der Stadt existieren und welche Rolle die Elektromobilität dabei spielen kann.

Im Unterschied zum Fallbeispiel Singapur, das als Stadtstaat gleichzeitig die Aufgaben eines Landes und einer Stadt erfüllt, handelt es sich bei Frankfurt am Main sowie den nachfolgenden Fallbeispielen um kein abgeschlossenes System in Bezug auf die Energieerzeugung. In Singapur endet die durchgeführte Analyse an den Landesgrenzen, was eine Betrachtung der Energieinfrastruktur unter verschiedenen Zusammensetzungen des Kraftwerkssektors sowie des Verkehrssektors sinnvoll ermöglicht. Eine analoge Vorgehensweise würde für Frankfurt am Main, Ingolstadt und die Gemeinde Schöllnach identische Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung des Primärenergiebedarfs oder der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor sowie insgesamt bedeuten, da alle drei Fallbeispiele innerhalb des Energiesystems Deutschland liegen und somit auf demselben Bezugssystem basieren. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel für Frankfurt die auf dem Stadtgebiet bestehenden Möglichkeiten der Energieerzeugung herangezogen.

Die aktuelle Stromzusammensetzung in Frankfurt am Main ist **Tabelle 5.2** zu entnehmen.

Es wird deutlich, dass der Großteil des Stromes in Frankfurt am Main (31,5 %) aus erneuerbaren Energien stammt und die elektrische Energie somit zu knapp einem Drittel emissionsfrei erzeugt werden kann. An zweiter Stelle folgt der Energieträger Kohle mit gut 30 %. Auf Erdgas und Kernkraft entfallen 10,7 % bzw. 9,9 %. Sonstige fossile Energieträger erreichen 3,5 %, während 14 % auf sonstige erneuerbare

Energien entfallen. Diese Zusammensetzung und die Berücksichtigung von spezifischen Emissionsfaktoren führt zu Emissionen von 365 g CO₂ pro erzeugter kWh Strom [128].

Tabelle 5.2: Gesamtstrommix im Versorgungsgebiet der Mainova (Daten: [128])

<i>Energieträger</i>	<i>Anteil an Gesamtstromerzeugung [%]</i>
Erneuerbare Energien	31,5
Kernkraft	9,9
Kohle	30,4
Erdgas	10,7
Sonstige fossile Energieträger	3,5
Sonstige erneuerbare Energien	14,0

Vor allen Dingen vor dem Hintergrund eines steigenden und dynamischeren Strombedarfs durch die potentielle Integration von Elektrofahrzeugen ist die Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung in der Stadt Frankfurt sowie die Steigerung der Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern ein wichtiger Aspekt. Eine Möglichkeit und interessante Alternative stellt der Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen dar. Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme kann ein sehr hoher Nutzungsgrad erzielt werden. Gleichzeitig können Elektrofahrzeuge vom erzeugten Strom profitieren. Eine kontinuierliche Nutzung bzw. Abnahme von Strom und Wärme während des gesamten Jahres ist jedoch Voraussetzung, um diese Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können. Aus diesem Grund eignen sich vorwiegend Mehrfamilienhäuser, die ganzjährig einen konstanten Wärmebedarf aufweisen. Auch in Gewerbebetrieben und Bürogebäuden sind diese Anlagen einzusetzen.

Für die Stadt Frankfurt sind in **Abbildung 5.25** Wohngebäude identifiziert worden, die theoretisch für den Einsatz derartiger Anlagen herangezogen werden könnten.

Gebäude, die bereits über einen Fernwärmeanschluss verfügen und innerhalb eines Fernwärmegebietes liegen (blau hinterlegte Fläche) sind von der Nutzung von BHKW-Anlagen ausgeschlossen, da eine Förderung dieser Anlagen in fernwärmeversorgten Gebieten nicht sinnvoll erscheint und regulatorisch auch ausgeschlossen ist. Eine Eignung wird zudem aufgrund von zu geringen Informationen über den Industrie- und Gewerbesektor nur für Wohngebäude ermittelt. Dabei werden nur die-

jenigen Verbraucher in die Betrachtungen miteinbezogen, die einen Jahreswärmebedarf von mindestens 40 MWh aufweisen.

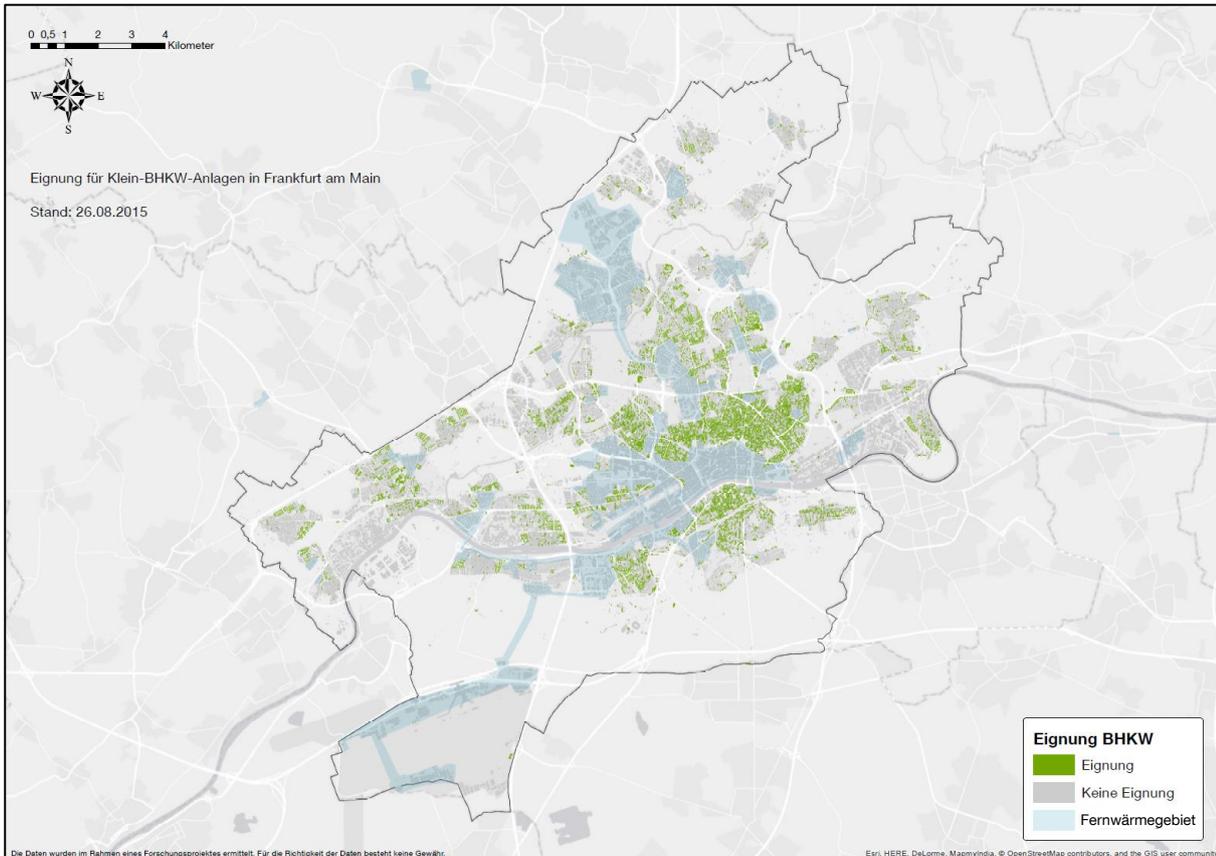


Abbildung 5.25: Theoretische Eignung von Gebäuden für Klein-BHKW-Anlagen in Frankfurt am Main (Daten: [126])

In obiger Grafik (Abbildung 5.25) ist angenommen, dass alle Wohngebäude bereits einer Vollsanierung unterzogen wurden und somit entsprechend ihrer Baualtersklasse den minimal erreichbaren spezifischen Wärmebedarf besitzen. Im unsanierten Zustand wäre das Potential deutlich größer, da mehr Gebäude aufgrund schlechterer Isolierung einen höheren jährlichen Wärmebedarf aufweisen und dies eine Eignung für eine größere Anzahl an Gebäuden bedeuten würde. Im Falle des unsanierten Zustandes ergibt die Untersuchung ein maximales theoretisches Potential für Wärme von etwa 2,9 TWh/a. Dies verringert sich jedoch im vollständig sanierten Fall auf 1,2 TWh/a. Auffallend ist, dass vor allem in den Außenbereichen (ländlich) die Potentiale vergleichsweise gering ausfallen, während sie in dichter bebauten Gebieten in der Innenstadt auch nach einer Sanierung bestehen bleiben. Eine Einschränkung erfahren diese Gebiete jedoch durch die bereits vorhandene Fernwärmeversorgung. Durch die kombinierte Erzeugung wird bei zusätzlicher Gasnachfrage Strom durch die BHKW-Anlagen produziert. Hier wird die Annahme getroffen, dass

die Anlagen durch typische Parameter definiert sind und 80 % des Gesamtwärmebedarfs des Gebäudes decken. Der Gesamtnutzungsgrad beträgt 90 %. Ferner wird das Verhältnis zwischen erzeugtem Strom und bereitgestellter Wärme zu 45 % angenommen. Somit erzeugen die BHKW-Anlagen in diesem Beispiel insgesamt 560 GWh Strom pro Jahr. Grundsätzlich ist dieses vergleichsweise hohe BHKW-Potential der Stadt dazu geeignet, kostengünstigen Strom zur Ladung von Elektrofahrzeugen zu erzeugen. Der überschüssige Strom kann z. B. zur Speisung von Ladestationen, die von Bewohnern genutzt werden, Verwendung finden. Diese Möglichkeit bietet sich zudem auch für kleine Gewerbebetriebe an. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass die Laufzeiten von wärmegeführten BHKW-Anlagen im Sommer durch die geringere Wärmenachfrage reduziert sind.

Solarstrom hat sich bei der Umsetzung der Energiewende in Deutschland zu einer entscheidenden Option entwickelt, von der auch der Einsatz von Elektrofahrzeugen profitieren kann. Gerade die Kombination der Energieerzeugung aus Klein-BHKW-Anlagen sowie PV-Anlagen und der Nutzung eines Elektrofahrzeuges kann sich als sinnvolle und attraktive Alternative für die Zukunft herausstellen.

Photovoltaik stellt für Frankfurt zukünftig zusätzlich eine bedeutende regenerative Energiequelle zur Stromproduktion dar. Zur Bestimmung des Photovoltaikpotentials wurden für das gesamte Stadtgebiet digitale Gebäudedaten herangezogen. Zunächst sind geeignete Gebäude für PV-Installationen auszuwählen. Nicht geeignete Gebäude wie Gebäude besonderer funktionaler Prägung (z. B. Kirchen, Tiefgaragen etc.) sind nicht Bestandteil der Untersuchung. Da Frankfurt von vergleichsweise hohen Gebäuden charakterisiert ist, werden Bauten höher als 60 m als ungeeignet eingestuft. Zum einen liegt dies an der in diesen Fällen aufwendigen Installation der Anlagen, zum anderen sind die Dachflächen derartiger Gebäude häufig bereits durch zahlreiche Dachaufbauten belegt. Es erfolgt anschließend eine Abschätzung der Dachflächen für unterschiedliche Dachtypen. Die maximal installierbare Leistung wird schließlich mittels eines Leistungsfaktors ($0,1 \text{ kW/m}^2$) bestimmt.

Das für Frankfurt gebäudescharf ermittelte Photovoltaikpotential wurde einer Rasterung unterworfen und ist in $200 \times 200 \text{ m}$ -Auflösung in **Abbildung 5.26** dargestellt.

Deutlich treten Gebiete hervor, in denen ein besonders hohes PV-Potential errechnet worden ist. Dies liegt in den zentralen Stadtbereichen vorwiegend an der hohen Bebauungsdichte. Für Gebiete, die eine hohe Gesamtdachfläche aufweisen (z. B. um den Frankfurter Flughafen), kann ebenfalls ein erhöhtes PV-Potential ausgewiesen werden. Die dargestellte Rasterung führt dazu, dass die Leistungs- bzw. Energie-

dichte in den weniger dicht besiedelten und ländlichen Bereichen geringer ausfällt. Gebäude in diesen Regionen eignen sich jedoch besonders gut für die Nutzung von Photovoltaikanlagen.

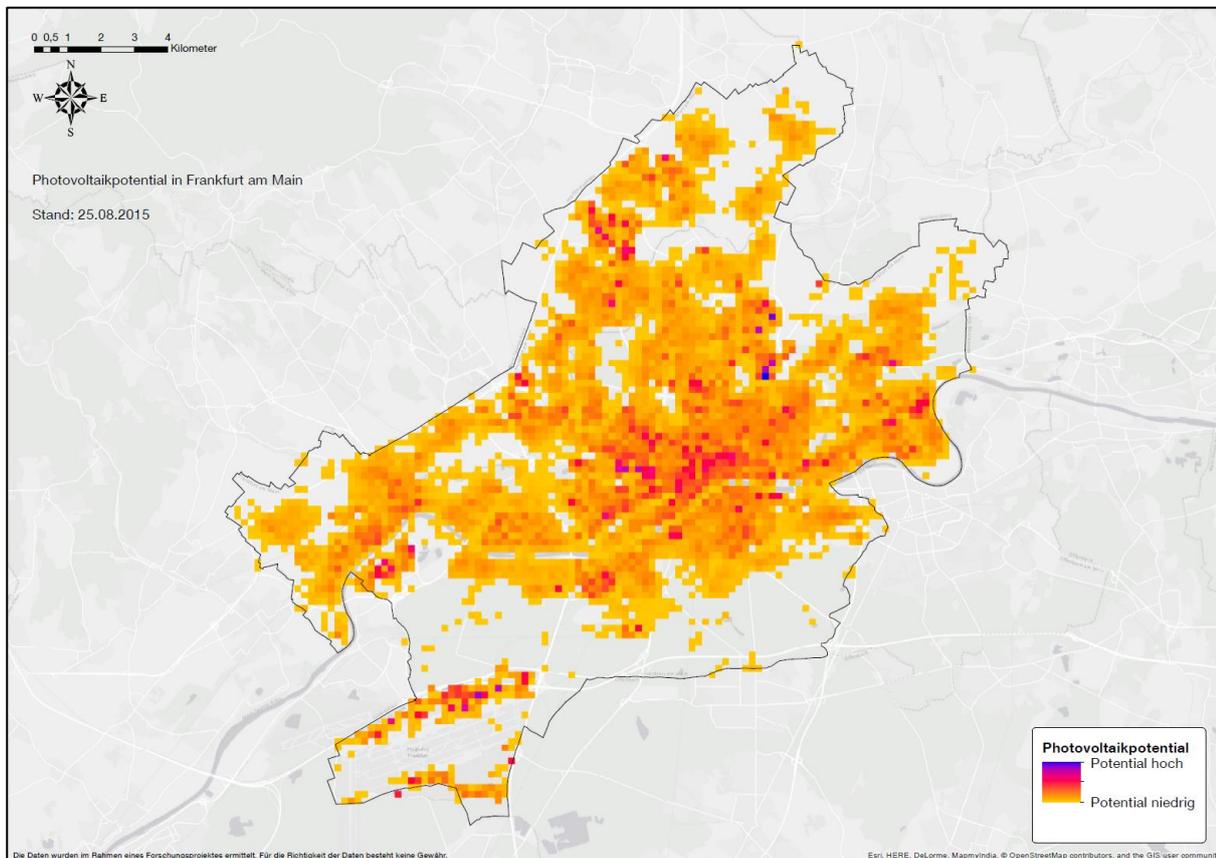


Abbildung 5.26: Photovoltaikpotential in Frankfurt am Main in 200 x 200 m-Raster (Daten: [126])

Es handelt es sich hierbei um das technische Potential, das durch Verschattungen (Vegetation bzw. hohe Gebäude) weiter reduziert wird. Wird davon ausgegangen, dass zukünftig 50 % des hier ermittelten Potentials ausgebaut werden, ergibt sich pro Einwohner eine installierte PV-Leistung von 1.000 bis 1.200 W. Bei 30-prozentiger Nutzung des Potentials kann eine spezifische Leistung von 700 bis 800 W pro Einwohner erreicht werden. Aktuell liegen die Werte für Frankfurt bei 34,3 W pro Einwohner bzw. 0,03 m² pro Einwohner [129]. Frankfurt liegt damit im Mittelfeld der deutschen Großstädte, was den aktuellen PV-Ausbau betrifft. Gebäude, denen sowohl Klein-BHKW- als auch PV-Eignung bescheinigt wird, sind durch ein optimiertes Management in der Lage, ein Elektrofahrzeug mit CO₂-freiem Strom zu betanken. Gerade im Winter könnte dazu der Strom aus der BHKW-Anlage genutzt werden, im Sommer die photovoltaisch erzeugte Elektrizität.

Wie Elektrofahrzeuge zusammen mit einer regenerativen Energieversorgung effizient in Wohngebäude integriert werden können, demonstriert das Modellprojekt „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in Berlin. Das Gebäude produziert mehr Energie, als die Nutzer gesamt auch unter Berücksichtigung des Betriebes zweier Elektrofahrzeuge benötigen. Dazu wird zum einen eine Photovoltaikanlage zur Stromerzeugung und zum anderen eine Wärmepumpe zur Deckung des Wärmebedarfs des Gebäudes eingesetzt. Der überschüssige Strom kann in das öffentliche Netz eingespeist werden oder steht über einen stationären Speicher zum Laden der Fahrzeugbatterien zur Verfügung. [130]

In Abbildung 5.26 konnte beobachtet werden, dass das Photovoltaikpotential in Frankfurt am Main relativ hoch ausfällt und sich vor allen Dingen in den ländlicheren Bereichen der Stadt eine große Anzahl an Gebäuden zur Stromerzeugung mittels PV eignet. Dezentrale Wärmeerzeugung hingegen kann auch durch die Nutzung von Wärmepumpen geschehen. Neue Gebäude, die bereits dank besserer Isolierungen über einen geringeren Wärmebedarf verfügen, können vom Einsatz dieser Technologie profitieren. Zusammen mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen besteht die Möglichkeit, ein dezentrales Energiesystem zu erzeugen und unabhängig von fossilen Energieträgern zu werden. Ein Großteil der Frankfurter Gebäude wird derzeit zudem mit Fernwärme als umweltfreundliche und zukünftig wichtige Technologie versorgt. Frankfurt zeigt insgesamt ein hohes Fernwärmepotential. [131]

Eine Untersuchung der Eignung von Gebäuden in Frankfurt für Wärmepumpen mit Flächenkollektoren basiert auf dem Wärmeverbrauch des Gebäudes und der verfügbaren unbebauten Fläche des zum Gebäude gehörenden Grundstücks. Um die tatsächlich für Flächenkollektoren nutzbare Fläche zu ermitteln, sind Gebäudegrundflächen und weitere versiegelte Bereiche von der Grundstücksfläche abzuziehen. Die Summe der Wärmebedarfe aller auf dem Flurstück befindlichen Gebäude wird dem Grundstück zugeordnet und anschließend eine Grenze von $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ festgesetzt, sodass typische Verbraucher versorgt werden können. Diese Grenze spiegelt die Eignung des Flurstücks zur Deckung des Wärmebedarfs aller darauf stehenden Gebäude wider.

Für dieses Beispiel sind die Ergebnisse in Frankfurt am Main in **Abbildung 5.27** visualisiert.

Wie zu erwarten, eignet sich diese Alternative der Wärmebedarfsdeckung vorwiegend für den weniger dicht besiedelten Bereich des Stadtgebietes. Diese ländlicheren Bereiche sind häufig von Ein- und Zweifamilienhaussiedlungen geprägt. Im Ge-

gensatz dazu zeigt die Frankfurter Innenstadt kaum ein nutzbares Potential für derartige Wärmepumpen. Vom Zentrum ausgehend hin zu den Stadträndern und den umliegenden Stadtteilen ist eine immer größer werdende Eignung von Gebäuden festzustellen. In dargestellter Situation (unsaniertes Zustand der Gebäude) ist mit einem jährlichen Wärmepotential von 1,8 TWh zu rechnen, das sich im Falle einer Sanierung der Gebäude deutlich auf 0,9 TWh verringert. Bei der Ermittlung des Wärmepumpenpotentials werden nur Gebäude als geeignet eingestuft, die auch im unsanierten Zustand eine Eignung aufweisen (langfristige Planbarkeit der Heizungsanlage). Die Menge elektrischen Stroms, die von den eingesetzten Anlagen bezogen wird, kann mithilfe eines COP (Coefficient of Performance) von 3,5 ermittelt werden.

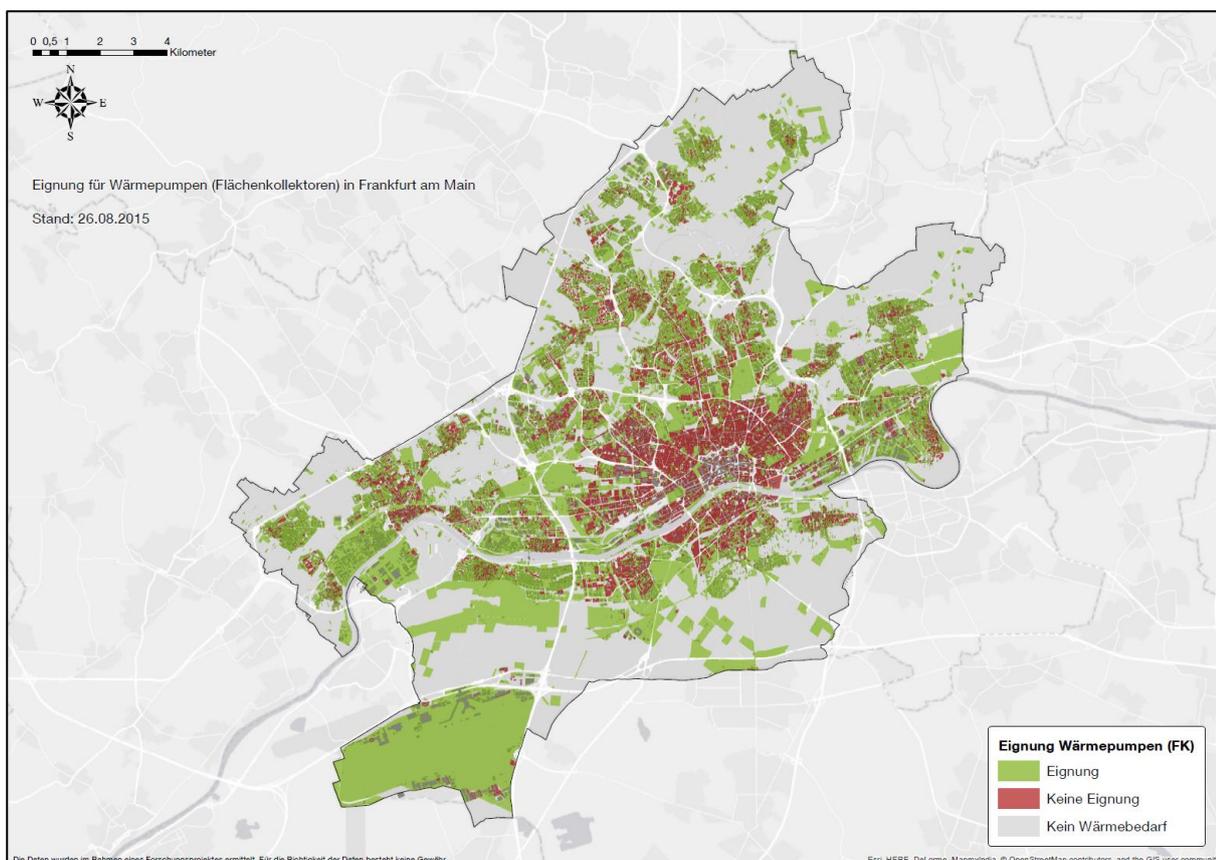


Abbildung 5.27: Theoretische Eignung von Flurstücken bzw. Gebäuden für Wärmepumpen (Flächenkollektoren) in Frankfurt am Main (Daten: [126])

Die analysierten Potentiale vor allen Dingen im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (Klein-BHKW-Anlagen) und der Photovoltaik könnten zukünftig zumindest für die ländlichen Bereiche Frankfurts, wo sowohl BHKW- als auch PV-Eignung gegeben ist, eine interessante Alternative zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs darstellen. Überschüssiger Strom aus PV- sowie aus BHKW-Anlagen könnte somit zum

Laden von Fahrzeugbatterien verwendet werden. Eine Abstimmung und Anpassung der Erzeugungs- und Bedarfskurven der Technologien ist dabei notwendig. Für Klein-BHKW-Anlagen wirkt sich zudem eine längere Laufzeit wirtschaftlich positiv aus. Eine Kopplung von Elektrofahrzeugen mit CO₂-neutralem oder CO₂-armem Strom würde zudem die indirekten Emissionen der Elektromobilität reduzieren.

Die Einflüsse von Änderungsprozessen innerhalb der Energieversorgung in Frankfurt am Main auf Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur sowie auf Energieversorgungsnetze sind zusätzlich in [131] und [132] für das Stadtgebiet untersucht worden.

5.2.2 Ingolstadt

Nach der Darstellung der Ergebnisse für Singapur und Frankfurt am Main und die Ableitung von grundlegenden strukturspezifischen Erkenntnissen wird nun die Stadt Ingolstadt als drittes Fallbeispiel diskutiert.

5.2.2.1 Verkehrs- und Parkraumstruktur

Zunächst gilt es wieder, die Verkehrs- und Parkraumstruktur innerhalb des Stadtgebietes analog zur Vorgehensweise bei Singapur und Frankfurt zu untersuchen.

Die Verteilung des Transportaufkommens auf die verschiedenen Verkehrsmittel in Ingolstadt ist in **Abbildung 5.28** grafisch dargestellt.

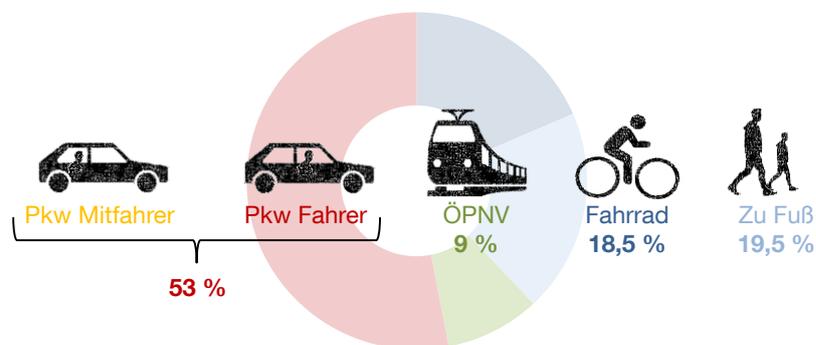


Abbildung 5.28: Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Ingolstadt (Daten: [133])

Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs für Pkw beläuft sich in Ingolstadt auf 53 % und ist gegenüber der Stadt Frankfurt deutlich erhöht. Gleichzeitig kommt es zu einer Abnahme der ÖPNV-Nutzung gegenüber Frankfurt auf 9 % Anteil an den Gesamtwegen. Das Fahrrad wird in Ingolstadt für 18,5 % aller Wege genutzt, für Fußwege wird ein Anteil von 19,5 % ausgewiesen. Grundsätzlich spielt für die Stadt bzw. den Landkreis Ingolstadt im Vergleich zu Singapur oder Frankfurt der Pkw eine größere Rolle. Dies ist natürlich dem weniger flächendeckend ausgebauten öffentli-

chen Nahverkehrsnetz (Angebot) sowie der zunehmenden Ländlichkeit innerhalb des Stadtgebietes geschuldet. Infolgedessen ist ein Großteil der Ingolstädter Bevölkerung auf die Nutzung des motorisierten Individualverkehrs und somit des Pkw angewiesen.

Das Kraftfahrtbundesamt weist für die Stadt Ingolstadt 91.937 Pkw aus (Stand Januar 2015) [99]. Zusätzlich bewegen sich Berufseinpender (Pkw-Nutzer) regelmäßig innerhalb des Stadtgebietes und müssen daher im Hinblick auf die Abstellmöglichkeiten in Betracht gezogen werden. Ein Teil der in Ingolstadt zugelassenen Fahrzeuge dürfte sich zudem nicht dauerhaft innerhalb des Stadtgebietes aufhalten.

Abbildung 5.29 zeigt die Parkraum- und Parkflächenstruktur Ingolstadts.

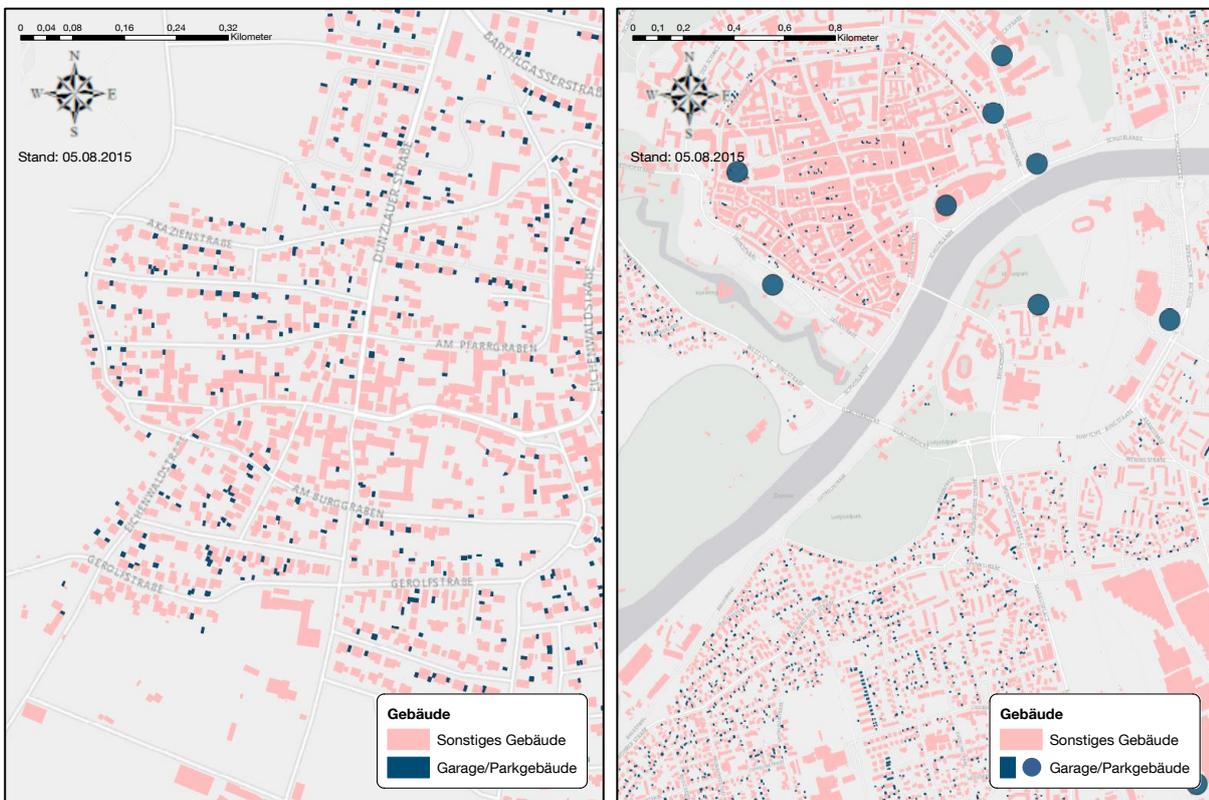


Abbildung 5.29: Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen im ländlichen (Gerolfing, links) sowie in Parkgebäuden und Parkplätzen im städtischen Ingolstadt (Stadtkern, rechts) (Datengrundlage: [134])

Es wird deutlich, dass auch in Ingolstadt in den ländlich geprägten Außenbereichen neben dem Straßenparken eine dezentrale, privat angelegte Parkraumstruktur existiert, die von Ein- oder Mehrfamilienhausbesitzern zum Abstellen ihrer Fahrzeuge genutzt wird. Im innerstädtischen Bereich sind gelegentlich Einzel- und Doppelgaragen vorzufinden sowie mehrere große öffentliche Parkplätze und Tiefgaragen. Die

Dichte bezüglich dieser Unterbringungsmöglichkeiten liegt jedoch weit hinter der Singapurs und Frankfurts zurück.

Die auf digitalen Geodaten basierende Analyse für Ingolstadt führt zunächst zu einer Bevölkerungsverteilung, die in **Abbildung 5.30** grafisch dargestellt ist. Die Auflösung beträgt 200 x 200 m.

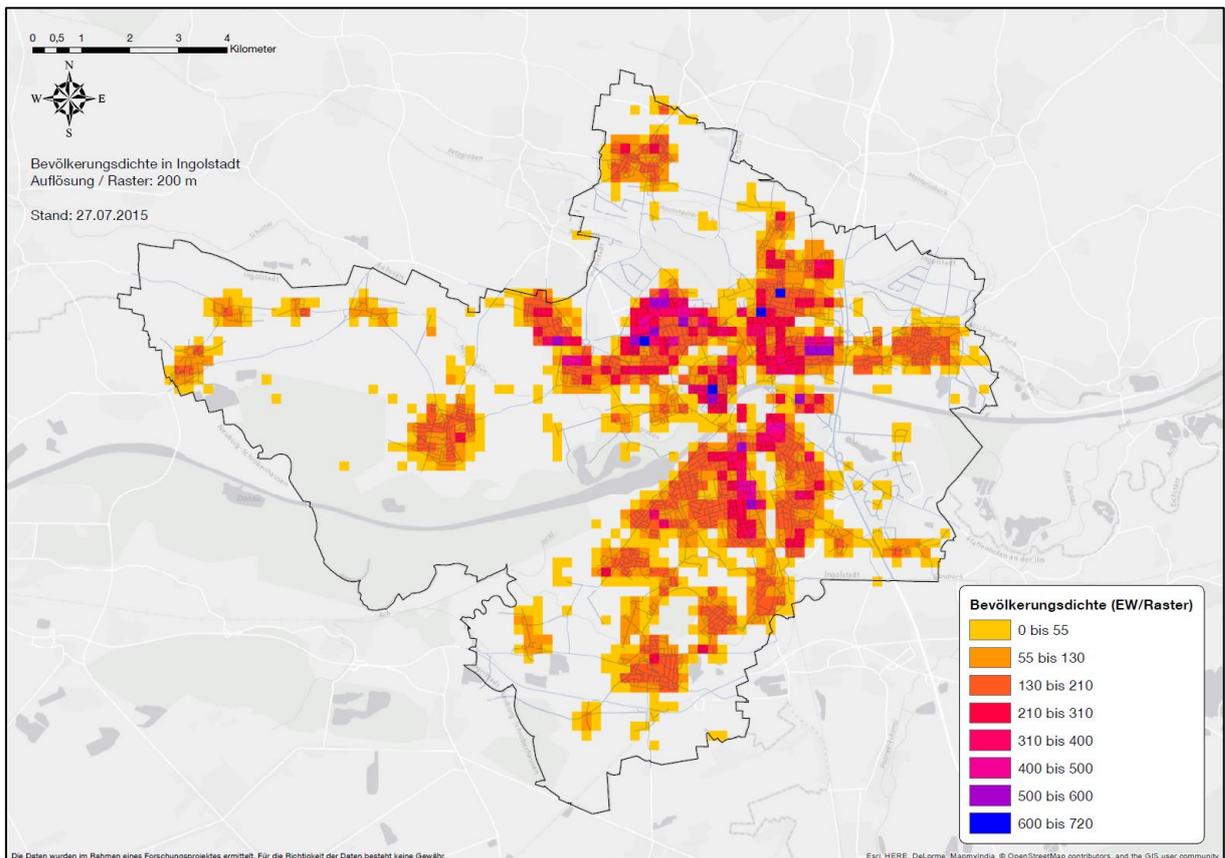


Abbildung 5.30: Bevölkerungsdichte in Ingolstadt mit einer Auflösung von 200 m (Datengrundlage: [134])

In Ingolstadt Mitte (Altstadt) ist eine vergleichsweise hohe Bevölkerungsdichte festzustellen, genauso wie nordöstlich und nordwestlich des Innenstadtbereichs. In diesen Gebieten sind tendenziell mehr Wohngebäude und Gebäude höherer Geschossanzahl vorzufinden. In den auf dem Stadtgebiet liegenden Ortschaften, die gegenüber dem Innenstadtbereich mehr ländlichere Eigenschaften zeigen, nimmt die Bevölkerungsdichte erwartungsgemäß ab und erreicht Werte von nur mehr 200 Einwohner pro Rasterpunkt. Die so durchgeführte Analyse liefert eine Bevölkerungszahl für Ingolstadt von 130.000.

Um die Parkraumstruktur innerhalb des Stadtgebietes beurteilen zu können, ist im nächsten Schritt aufbauend auf der Bevölkerungsverteilung die Ermittlung der Pkw-

Dichte in Ingolstadt erforderlich. Die in 100 x 100 m gerasterte Dichte ist Bestandteil von **Abbildung 5.31**.

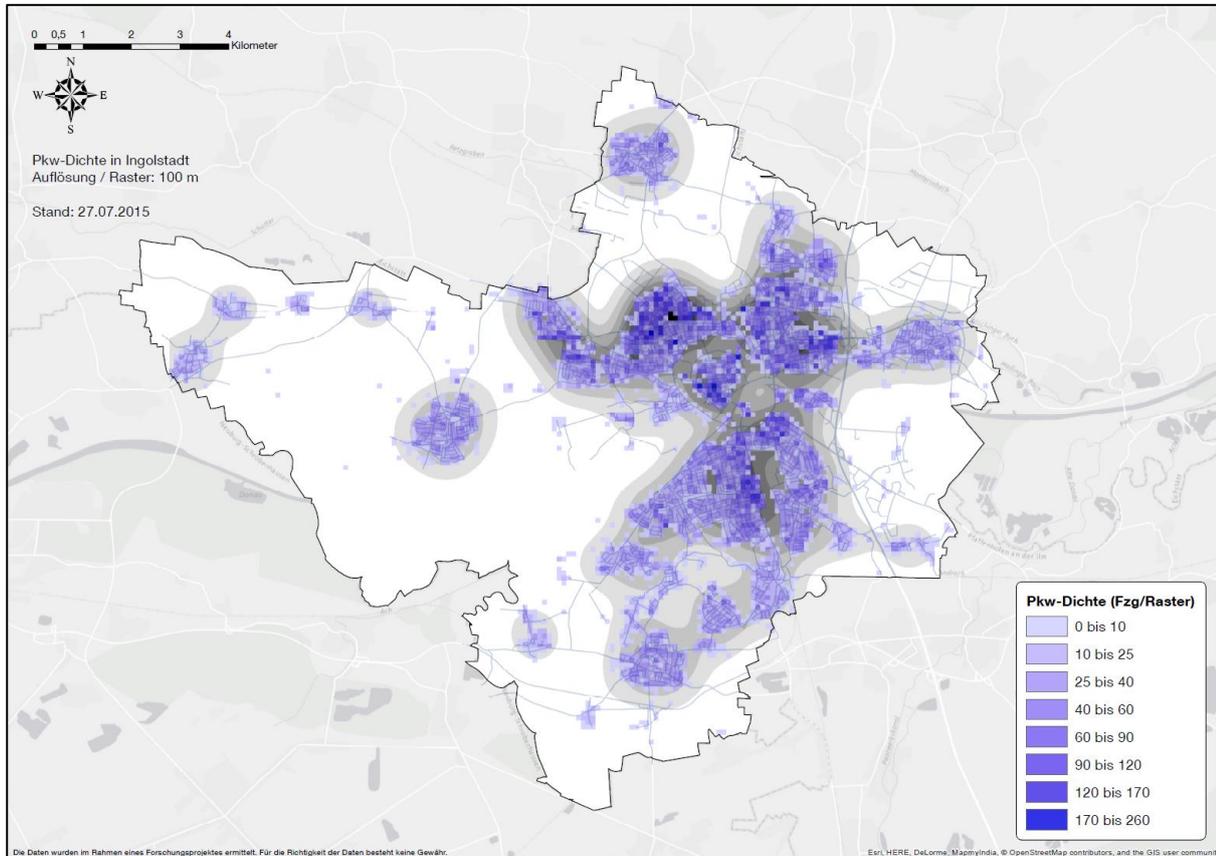


Abbildung 5.31: Pkw-Dichte in Ingolstadt mit einer Auflösung von 100 m (Datengrundlage: [134])

Analog zu Frankfurt kann hier der Motorisierungsgrad für Pkw standortabhängig bestimmt werden. Der Nordosten des Stadtgebietes zeigt eine ausgeprägte Pkw-Dichte. Dies ist auch der Fall für den Nordwesten, die Innenstadt und den Bereich rund um den Hauptbahnhof südlich der Donau. Zu den Stadträndern hin nimmt der Motorisierungsgrad zwar deutlich zu, was sich jedoch aufgrund der niedrigeren Bevölkerungsdichten nicht in gesteigerten Pkw-Dichten niederschlägt. Insgesamt kann für das gesamte Stadtgebiet aufbauend auf den gegebenen Daten eine Zahl von 92.000 Fahrzeugen ermittelt werden. Für etwaige Park- und Unterbringungsmöglichkeiten sind jedoch zusätzlich weitere Fahrzeuge von z. B. Berufseinspendlern zu berücksichtigen.

Mithilfe des in Ingolstadt räumlich ermittelten Fahrzeugbestandes und der Einbeziehung von Daten zum Straßennetz aus OpenStreetMap kann die Unterbringung dieser Fahrzeuge (ohne Berufseinspendler) zunächst auf den Ingolstädter Straßen untersucht und potentielle Hotspots sowie Gebiete unzureichenden Parkkontingents aus-

gemacht werden. Stellplätze in Einzel-, Doppel- und Parkgaragen oder großen öffentlichen Parkplätzen finden an dieser Stelle noch keine Beachtung. Aufschluss über die demnach entstehende Situation gibt **Abbildung 5.32**.

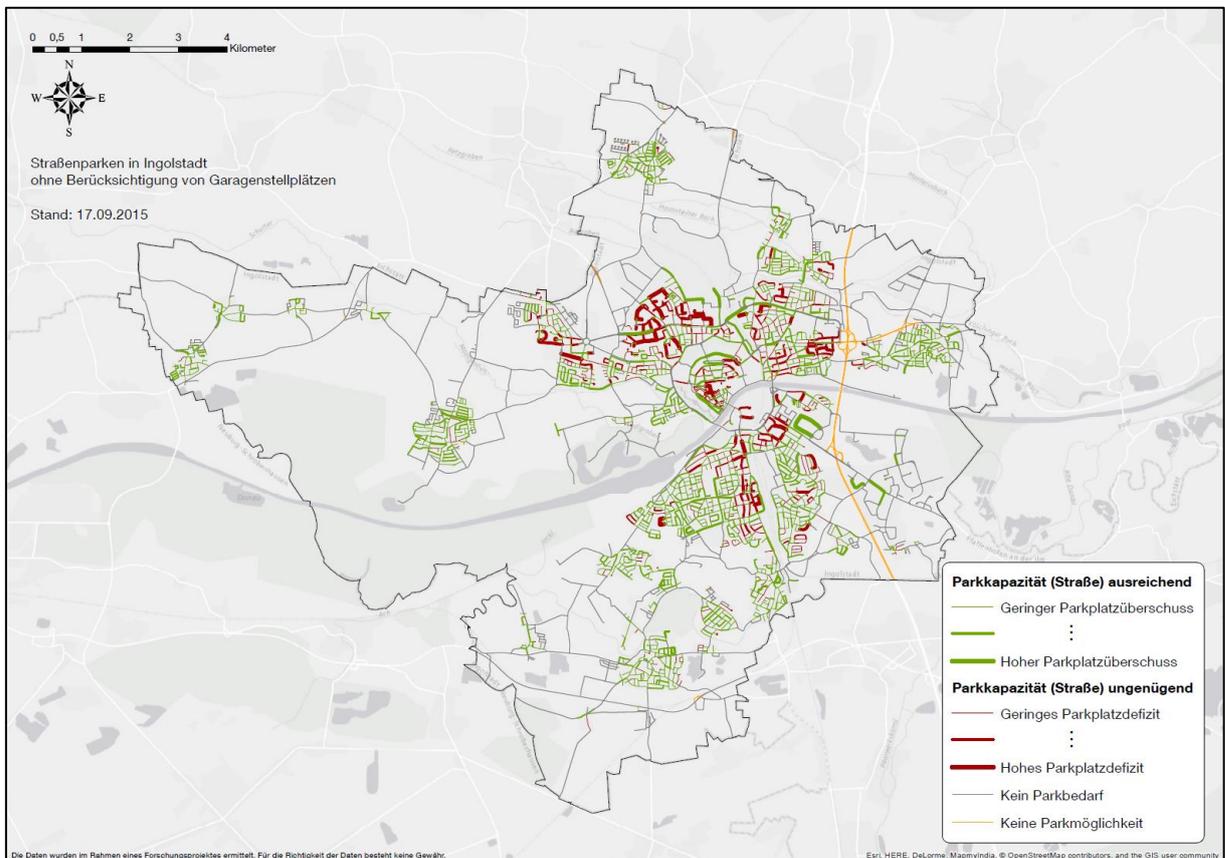


Abbildung 5.32: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Ingolstadt ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [134], OpenStreetMap)

Anders als in Frankfurt am Main zeigt sich die Lage aufgrund der niedrigeren Bevölkerungsdichte und des weniger dicht bebauten innerstädtischen Kerns wesentlich entspannter. Zu entscheidenden Parkplatzdefiziten kommt es erwartungsgemäß in denjenigen Gebieten, die sowohl durch eine hohe Bevölkerungs- als auch eine hohe Pkw-Dichte auffallen (Nordwesten sowie entlang des Hauptbahnhofs südlich der Donau). In den umliegenden kleineren Ortschaften ist es theoretisch nahezu vollständig möglich, sämtliche Pkw auf den öffentlichen Straßen zu parken. Natürlich ist auch an dieser Stelle zu beachten, dass die Gesamtzahl der ermittelten Pkw nicht zur selben Zeit geparkt werden muss und somit eine Fluktuation innerhalb der Gebiete (Wohngebiet, Industriegebiet etc.) gegeben ist. Ein Parkstand am Straßenrand kann deshalb durchaus auch von mehreren Fahrzeugen genutzt werden. Auch der Einfluss durch Berufseinpender und Berufsauspendler spielt dabei eine Rolle.

Straßenparkstände sind zur Unterbringung der ermittelten Fahrzeuge nicht allein sinnvoll. Neben der Straße als Abstellort existieren in Ingolstadt weitere Parkmöglichkeiten in Einzel- und Doppelgaragen sowie in öffentlichen Parkgaragen und Parkplätzen. Welchen Einfluss das Abstellen von Pkw in diesen Parkeinrichtungen auf die Situation in Abbildung 5.32 hat, ist in **Abbildung 5.33** dargestellt.

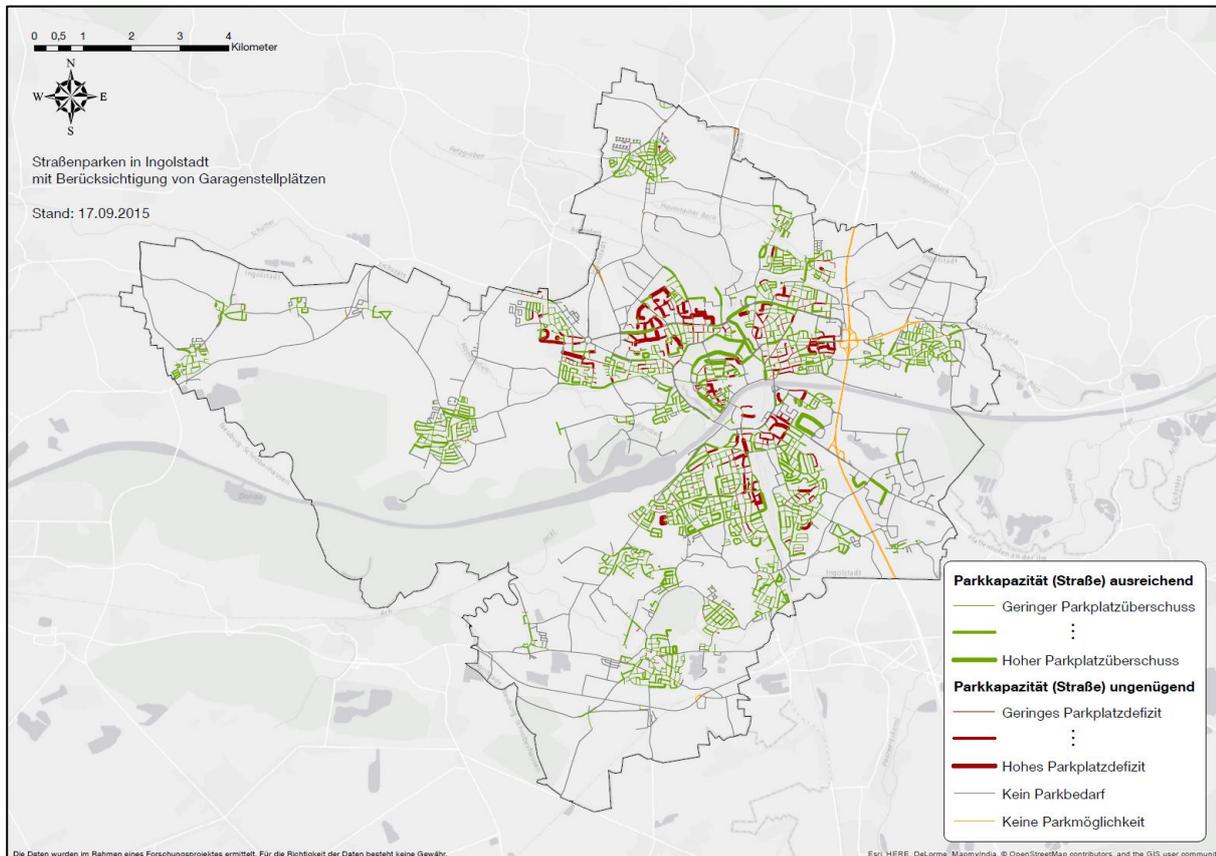


Abbildung 5.33: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Ingolstadt unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [134], OpenStreetMap)

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass es an einigen Stellen zu einer Entschärfung des Parkplatzdefizites kommt. Dennoch hat das Abstellen von Pkw in privaten und öffentlichen Parkgaragen oder Parkplätzen weniger Einfluss im Vergleich zur Situation in der Stadt Frankfurt am Main. In Ingolstadt sind in den umliegenden Ortschaften ohnehin keine Einschränkungen im Straßenparken erkannt worden. Durch die Nutzung von Privatgaragen kommt es deshalb an diesen Stellen theoretisch zu höheren Parkplatzüberschüssen. Im Innenstadtbereich existieren im Vergleich zu Frankfurt deutlich weniger Parkmöglichkeiten in öffentlichen und halböffentlichen Einrichtungen, sodass deren Nutzung keine entscheidende Veränderung der Parkplatzsituation in der Innenstadt nach sich zieht. Es bleibt zu erwähnen, dass zur Er-

mittlung dieser Grafiken unterstellt wird, dass sämtliche halböffentliche und öffentliche Parkgebäude und Parkplätze den für Ingolstadt errechneten Fahrzeugen zur Verfügung stehen. In Hinblick auf die nach Ingolstadt einpendelnden Beschäftigten ist deshalb zu beachten, dass diese zum Abstellen ihrer Pkw auf Parkstände auf öffentlichen Straßen oder in halböffentlichen und öffentlichen Parkgebäuden und Parkplätzen angewiesen sind.

Die Aufstellung in **Abbildung 5.34** zum Pkw-Bestand und der nutzbaren Parkstände und Stellplätze fasst die Situation in Ingolstadt noch einmal zusammen.

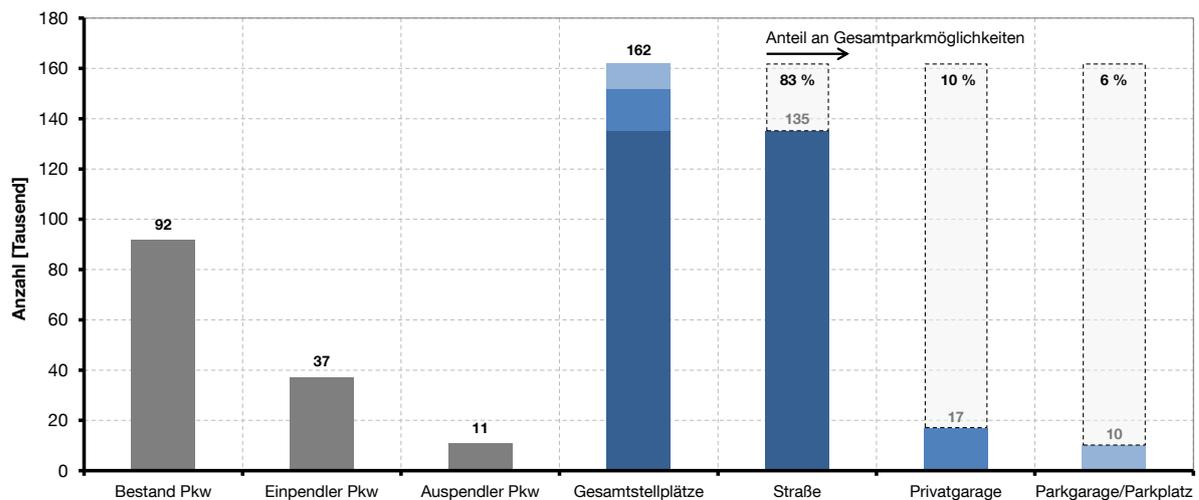


Abbildung 5.34: Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Ingolstadt

Insgesamt sind für das Stadtgebiet Ingolstadt 92.000 zu parkende Pkw ermittelt worden. Unter der Annahme, dass zwei Drittel aller Pendler einen Pkw für die Fahrt zur Arbeit nutzen, ergibt sich für die Berufseinpendler eine Zahl von 37.000 Pkw, während die aus Ingolstadt auspendelnden Beschäftigten rund 11.000 Pkw dafür nutzen. Wie bereits angeführt, ist während des Tages eine wesentlich größere Anzahl an Pkw zur Unterbringung innerhalb des Stadtgebietes von Ingolstadt zu berücksichtigen (Bestand - Auspendler + Einpendler) im Vergleich zur Situation in den Nachtstunden. Die Analyse der Parkplatzsituation ergibt 162.000 Parkmöglichkeiten, die theoretisch über das Stadtgebiet verteilt zur Verfügung stehen würden. Allein 135.000 sind entlang öffentlichen Straßen auszumachen, während 10 % in Einzelgaragen und lediglich 6 % in öffentlichen Parkgaragen und Parkplätzen zu identifizieren sind. Gegenüber Frankfurt, wo der Anteil noch 30 % beträgt, ist die Zahl der Abstellmöglichkeiten in Parkgaragen und Parkplätzen in Ingolstadt deutlich reduziert.

5.2.2.2 Energieinfrastruktur und Strombereitstellung

Analog zum Fallbeispiel Frankfurt beschränkt sich die Darstellung der Energieinfrastruktur und der Strombereitstellung sowie der potentiellen Rolle des Elektrofahrzeuges in Ingolstadt auf das Stadtgebiet der Untersuchungsregion.

Die Energieinfrastruktur in Ingolstadt ist im Rahmen der Erarbeitung eines Energienutzungsplanes bereits intensiv untersucht worden [101]. In Teilen ist dies auch in [108] geschehen. Dabei sind neben der Analyse des energetischen Ist-Zustandes die Potentiale der erneuerbaren Energien ermittelt und deren vermehrter Einsatz auf dem Stadtgebiet durch die Erstellung von möglichen Energiekonzepten geprüft worden. Bestandteile dieser Untersuchungen sollen hier vorgestellt und in Zusammenschau mit der Integration von Elektrofahrzeugen bewertet werden.

Was die Erzeugung von elektrischer Energie in Ingolstadt durch regenerative Energien betrifft, befindet sich die Stadt bereits heute in einer komfortablen Situation. Allein das Laufwasserkraftwerk Ingolstadt produziert im Jahr 130 GWh Strom, der jedoch ausschließlich in das Netz der DB Energie (Deutsche Bahn) eingespeist wird. Daneben werden bereits etwa 2.000 Solarthermieanlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von 17.000 m² sowie gut 1.800 Photovoltaikanlagen betrieben. Mit insgesamt 31 MW installierter PV-Leistung betrug die EEG-Einspeisung (EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz) im Jahr 2012 rund 30 GWh. Hinsichtlich der Solarthermie- und Photovoltaikdichte von 0,13 m² pro Einwohner bzw. 289 W pro Einwohner ist Ingolstadt in der Liste der deutschen Großstädte auf den vorderen Plätzen zu finden [129]. Rein rechnerisch könnten sich sämtliche Ingolstädter Haushalte vollkommen autark regenerativ versorgen. Neben Wasserkraft und Photovoltaik spielen zusätzlich die erzeugten Strommengen aus der Müllverbrennungsanlage mit 75 GWh sowie aus kleineren Klär-, Biogas- und Bioabfallanlagen und privaten Kleinwasserkraftanlagen eine entscheidende Rolle. Zusammen mit dem Strombedarf der Industrie (hauptsächlich verursacht durch die Audi AG) ergibt sich für Ingolstadt ein kumulierter Strombedarf von etwa 1.100 GWh/a. [101]

Die Stromzusammensetzung für die Stadt Ingolstadt im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt ist in **Tabelle 5.3** zusammengefasst. Etwa 34 % der Stromlieferung der Stadtwerke Ingolstadt im Versorgungsgebiet entfallen auf den Energieträger Kohle. 10 % Anteil besitzt die Kernenergie, 9 % Anteil an der Gesamtstromlieferung erreichen sonstige fossile Energieträger. 29 % entfallen auf erneuerbare Energien, die nach dem EEG gefördert werden. Der verbleibende Stromanteil wird auf sonstige erneuerbare Energien zu 11 % und den Energieträger Erdgas zu 7 %

aufgeteilt. Somit ergibt sich ein theoretischer CO₂-Emissionsfaktor von ca. 390 g/kWh.

Tabelle 5.3: Strommix im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt für das Jahr 2013 (Daten: [101])

<i>Energieträger</i>	<i>Anteil an Gesamtstromerzeugung [%]</i>
Erneuerbare Energien	29,0
Kernkraft	10,0
Kohle	34,0
Erdgas	7,0
Sonstige fossile Energieträger	9,0
Sonstige erneuerbare Energien	11,0

Die Potentialanalyse für die Windkraft auf dem Ingolstädter Stadtgebiet fußt neben dem Bayerischen Windatlas und der Gebietskulisse Windkraft auf Rasterdaten der mittleren jährlichen Weibull-Parameter in 80 m über Grund des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der besonderen Lage Ingolstadts in einem tiefgelegenen Becken die mittleren Windgeschwindigkeiten in 140 m nur in wenigen Bereichen 4,5 m/s überschreiten. Zudem schränken militärisch genutzte Areale sowie Wasser-, Vogel- und Naturschutzgebiete eine potentielle Nutzung der Windkraft weiter ein. Die Simulation einer Beispielanlage auf dem Stadtgebiet mit einer Nabenhöhe von 138 m liefert in einzelnen Arealen Volllaststunden von maximal 1.500 h (17 % Jahresnutzungsgrad) oder 3,5 GWh Energie pro Jahr und Anlage. Diese Gebiete kommen jedoch unter Berücksichtigung von Gebäudeabständen von z. B. 500 m oder 1000 m und weiterer Rahmenbedingungen zur Errichtung von Windenergieanlagen kaum in Betracht. [101]

Zum Biomassepotential tragen in Ingolstadt neben dem landwirtschaftlichen Potential Anteile aus der Forstwirtschaft sowie biogene Abfallstoffe bei. Zur Ermittlung des landwirtschaftlichen Potentials spielen die Nutztierhaltung sowie die Bewirtschaftung von Ackerflächen eine wesentliche Rolle. Unter Zugrundelegung des Ingolstädter Viehbestandes und typischer Werte für die Gasausbeute tierischer Substrate ergibt sich ein tierisches Biomassepotential in Ingolstadt von etwa 663.000 Nm³ Methan (6,6 GWh/a). Dies entspricht einer elektrischen Energiemenge von etwa 2.500 MWh_{el}/a. Auf landwirtschaftlichen Flächen können Energiepflanzen angebaut werden. Ein potentieller Nutzungskonflikt zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion wird vernachlässigt, sodass die derzeit im Untersuchungsgebiet Ingolstadt für Feld-

früchte reservierte Fläche unter Nutzung von Energiepflanzen (Grünland, Getreide-Ganzpflanzensilage, Silomais) analysiert werden kann. Das theoretische maximale landwirtschaftliche Biomassepotential (Energiepflanzen) beträgt somit für Methan unter Verwendung charakteristischer Werte für die Gasausbeute verschiedener pflanzlicher Substrate etwa 176 GWh_{el}/a oder 18 Mio. Nm³/a. Daraus kann eine elektrische Energiemenge von 67 GWh/a erzeugt werden. Neben landwirtschaftlicher Biomasse fällt Biomasse auch bei der Bewirtschaftung von Waldflächen an. Insgesamt bewirtschaftet die Stadt Ingolstadt etwa 730 ha Wald, 630 ha davon forstwirtschaftlich. Der jährliche Zuwachs pro ha von 4,8 Erntefestmeter ohne Rinde (Efm. o. R.) sowie ein Holzeinschlag von 2 Efm. o. R. führen zu einer jährlichen Energiemenge aus nachhaltig erzeugter Biomasse von ca. 7 GWh. Anfallender Bioabfall und Grünschnitt bergen ein Potential von jährlich gut 25 GWh. Das Gesamtpotential in der Untersuchungsregion fällt mit etwa 215 GWh/a gering aus. [101]

Das Wasserkraftpotential entlang der Donau und der kleineren Flüsse in Ingolstadt ist bereits nahezu vollständig ausgeschöpft. Denkbar sind jedoch zu prüfende Maßnahmen wie Erreichung eines besseren Ausbaugrades sowie eine kurzfristige Stauzielerhöhung, die zu einer Potentialsteigerung von etwa 7 % führen könnten. [101]

Analog zu den Untersuchungen in Frankfurt kann auch für Ingolstadt die Eignung von Gebäuden für Klein-BHKW-Anlagen in **Abbildung 5.35** bewertet werden.

Durch den Einsatz von derartigen Anlagen zur kombinierten Energieerzeugung (Wärme und Strom) können besonders hohe Effizienzen erreicht werden. Dadurch kann der Einsatz eine interessante Alternative zu herkömmlichen Heizungssystemen bieten. Auch in diesem Fall sind Gebäude, die über einen Fernwärmeanschluss verfügen, von der Eignung ausgeschlossen, da BHKW-Anlagen in Fernwärmegebieten nicht gefördert werden sollen.

BHKW-Anlagen können nur bei gleichzeitiger Wärme- und Stromnachfrage wirtschaftlich betrieben werden. Zudem sind Anlagen größerer Leistungsklassen wirtschaftlich sinnvoller, wodurch sich vor allem Mehrfamilienhäuser mit ganzjährig hohem Wärmebedarf eignen. Dabei wird ein Jahreswärmebedarf von 40 MWh vorausgesetzt (siehe Kapitel 5.2.1.2). Eine Eignung wird lediglich für Wohngebäude untersucht. Wird auch hier erneut von einem vollsanierten Zustand aller Gebäude ausgegangen, ergibt sich ein maximales Potential zur Deckung des Wärmebedarfs von 220 GWh/a. Ein zusätzlicher Restwärmebedarf von 57 GWh/a ist über Spitzenlastkessel zu decken. Wie dargestellt, eignen sich hauptsächlich Gebäude, die auch nach einer Vollsanieung noch einen hohen Wärmebedarf aufweisen (grün).

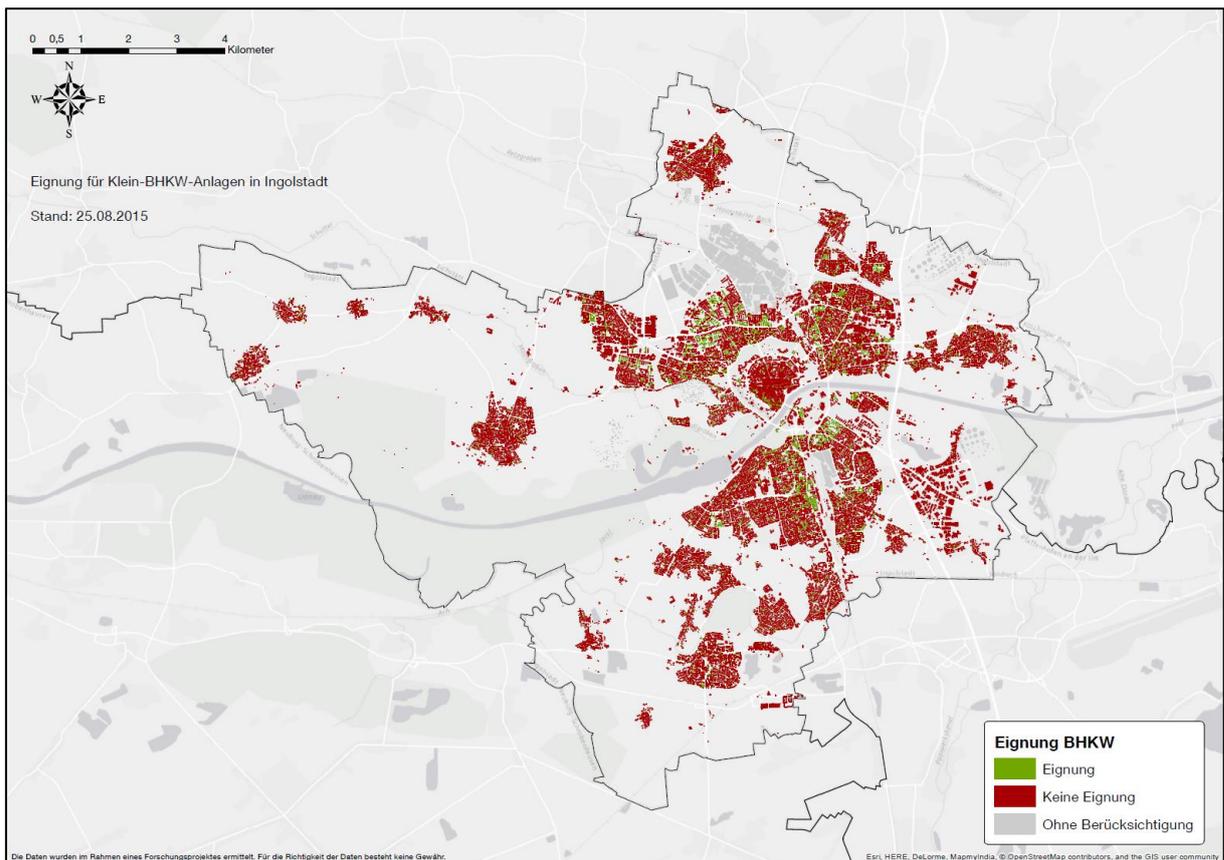


Abbildung 5.35: Theoretische Eignung von Gebäuden für Klein-BHKW-Anlagen in Ingolstadt [101]

Der Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen trägt jedoch auch dazu bei, den CO₂-Ausstoß durch einen gesteigerten Gasverbrauch zu erhöhen. Hier ist mit einer Steigerung von etwa 16 % im Vergleich zu gasversorgten Gebäuden zu rechnen. Die erzeugte Strommenge beträgt unter der Annahme typischer Anlagenparameter bei maximaler Nutzung des Potentials ca. 100 GWh/a. Die aggregierte elektrische Gesamtleistung aller potentiellen Standorte beträgt 20 MW. Im Vergleich zu Frankfurt zeigen deutlich weniger Gebäude eine Eignung für Klein-BHKW-Anlagen.

Auch für Ingolstadt stellt die Stromerzeugung aus Photovoltaik einen überaus wichtigen Aspekt dar. Diese Technologie ist dort bereits verhältnismäßig weit ausgebaut. Die Analyse des Solarpotentials in Ingolstadt basiert wie in der Untersuchungsregion Frankfurt auf geometrischen Gebäudedaten. Dabei sind Dachflächen, Dachneigungen sowie Ausrichtungen zur Bestimmung des PV-Potentials ausschlaggebend. Zusätzlich trägt die Untersuchung der Abschattung von Dachflächen Rechnung. Nach Abzug aller ungeeigneten und nicht zu betrachtenden Objekte (auch vorgegeben durch die aktuelle Beschlusslage der Stadt Ingolstadt) erfolgt entsprechend des Dachtyps des Gebäudes (Satteldach, Flachdach etc.) die Ermittlung der nutzbaren

Dachfläche. Die Bewertung orientiert sich an Elevation und Azimut des Daches. Anlagen mit einer zu geringen ermittelten Leistung (z. B. 5 kW_p) werden von der Betrachtung ausgeschlossen und nicht in die Berechnungen mit aufgenommen.

Das für Ingolstadt gebäudescharf auszuweisende Photovoltaikpotential ist in **Abbildung 5.36** in Rasterauflösung (200 x 200 m) wiedergegeben.

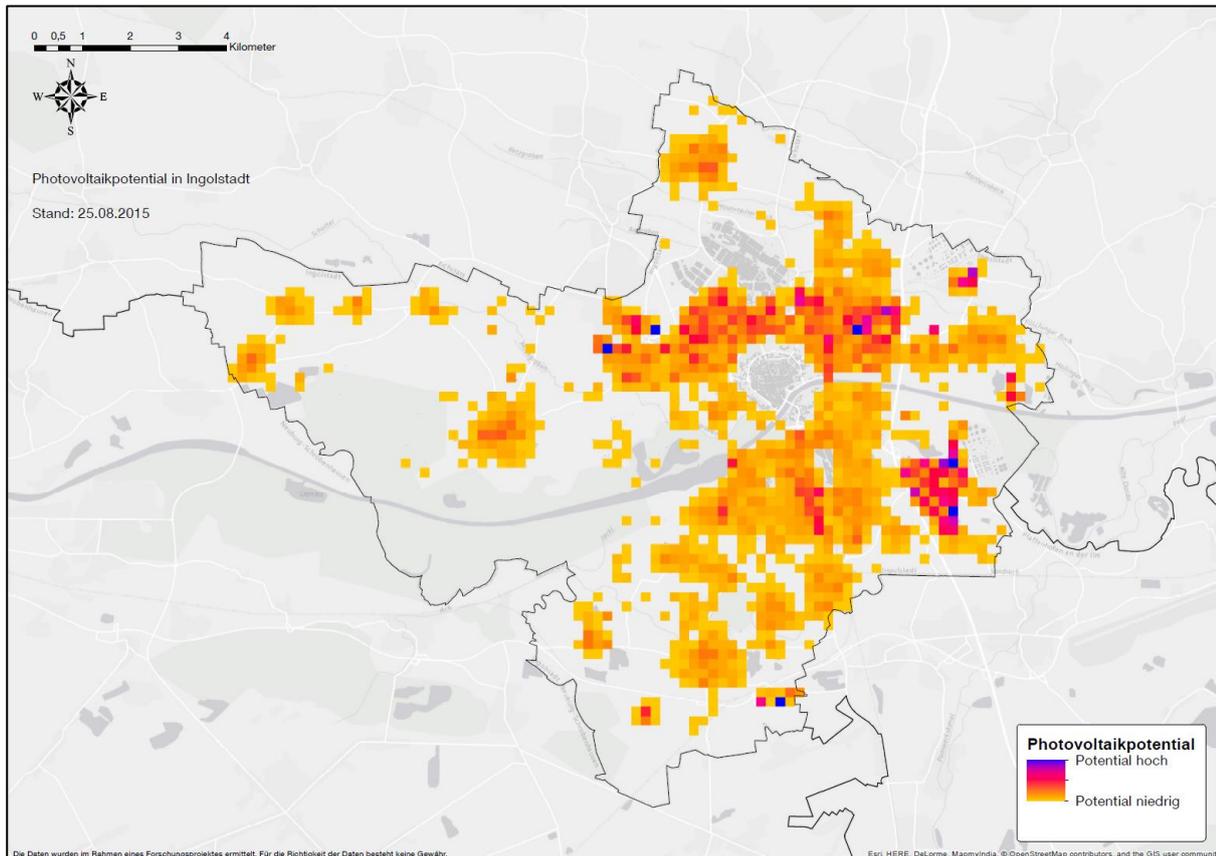


Abbildung 5.36: Photovoltaikpotential in Ingolstadt in 200 x 200 m-Raster [101]

Die Auswertungen zeigen, dass sich einzelne Gebiete und Stadtteile Ingolstadts entweder aufgrund sehr dichter Bebauung oder einer großen Gesamtdachfläche innerhalb des betrachteten Areals besonders gut für die Nutzung von Photovoltaikanlagen eignen würden. Gerade im nördlichen Stadtgebiet und im Nordosten der Stadt ist mit vergleichsweise hohen Potentialen zu rechnen, was in obiger Karte durch dunkel gefärbte Rasterpunkte hervorgeht. Nach Abzug der bereits bestehenden PV-Anlagen in Ingolstadt kann unter Anwendung dieser Methodik ein theoretisches maximal noch zu erschließendes Gesamtpotential von ca. 230 GWh/a errechnet werden. Gut 25 % der möglichen Jahresstromerzeugung sind abzuziehen, wenn die Verschattung der PV-Module in einfacher Weise faktorbasiert berücksichtigt

wird. Demnach ist mit etwa 170 GWh/a zu kalkulieren. Rechnerisch würde dies pro Einwohner ein noch auszuschöpfendes Potential von etwa 1.300 W bedeuten.

Das hohe ermittelte PV-Potential und große zusammenhängende Dachflächen sind ein idealer Ausgangspunkt, um photovoltaische Stromerzeugung mit neuartigen und flexiblen Verbrauchern zu koppeln. Gerade vor dem Hintergrund der Integration von Elektromobilität bieten sich damit für Ingolstadt interessante Versorgungskonzepte. In der Rolle Ingolstadts als Einpendlerstadt mit einer hohen Arbeitsplatzdichte ist es denkbar, die Elektromobilität durch den Einsatz von elektrisch betriebenen Pendlerfahrzeugen sinnvoll in die Alltagsmobilität zu integrieren. Im Allgemeinen stehen Pendlerfahrzeuge tagsüber auf den Parkplätzen der großen Arbeitgeber und verlassen erst wieder gegen Abend das Stadtgebiet. Die beschriebene Situation würde sich demnach grundsätzlich eignen, um die während des Tages produzierte Menge an PV-Strom zum Aufladen der Fahrzeugbatterien zu nutzen. Somit könnte eine sinnvolle Kombination aus photovoltaischer Stromerzeugung und der Nutzung von Elektromobilität geschaffen werden. Das hohe Potential der Photovoltaik könnte zudem auch von Gewerbetreibenden, die genau wie Pendler häufig kurze Strecken zurücklegen, in Ingolstadt sinnvoll eingesetzt werden. Aber auch für Privatpersonen bietet sich die Chance, PV mit der Nutzung von Klein-BHKW-Anlagen und Elektrofahrzeugen zu vereinen, wie bereits für die Stadt Frankfurt erläutert.

Auch für das Untersuchungsgebiet Ingolstadt sollen die Möglichkeiten geprüft werden, den Wärmebedarf von Gebäuden z. B. mittels Wärmepumpen (Grundwasser oder Flächenkollektoren) dezentral zu decken. Gebäude, die dann sowohl für Wärmepumpen als auch für die Nutzung von Klein-BHKW- oder PV-Anlagen gleichermaßen geeignet sind, könnten ohne die Nutzung fossiler Energieträger regenerativ erzeugten Überschussstrom zum Laden der Batterien von Elektrofahrzeugen liefern. Die Bewohner könnten somit ihre Alltagsmobilität elektromobil bestreiten.

Um die Eignung von Gebäuden für Wärmepumpen oder Erdwärmesonden in Ingolstadt zu beurteilen, sind mehrere Größen zu beachten. Zunächst ist das Geothermiepotential in Betracht zu ziehen. Dieses hängt wiederum von zahlreichen Faktoren ab. Die geothermischen Ergiebigkeiten weisen jedoch auf dem Großteil der Fläche Ingolstadts relativ geringe Werte auf, was das Potential von Erdwärmesonden stark einschränkt. Lediglich in der Südstadt kann ein Einsatz nach Einzelfallprüfung sinnvoll und wirtschaftlich sein. Zur Beurteilung der Eignung von Grundwasserwärmepumpen sind im Wesentlichen die Grundwassermächtigkeiten sowie die hydraulische Durchlässigkeit (Durchflussrate von Wasser durch den Boden oder den Fels) des Bodens relevant.

Die Kenntnis dieser Werte lässt eine Identifizierung geeigneter Gebäude auf dem Ingolstädter Stadtgebiet zu. Grün eingefärbte Gebäude in **Abbildung 5.37** sind also theoretisch zur Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe geeignet. Darüber hinaus sind natürlich in einem Folgeschritt die hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers zu untersuchen. Dies ist hier nicht geschehen.

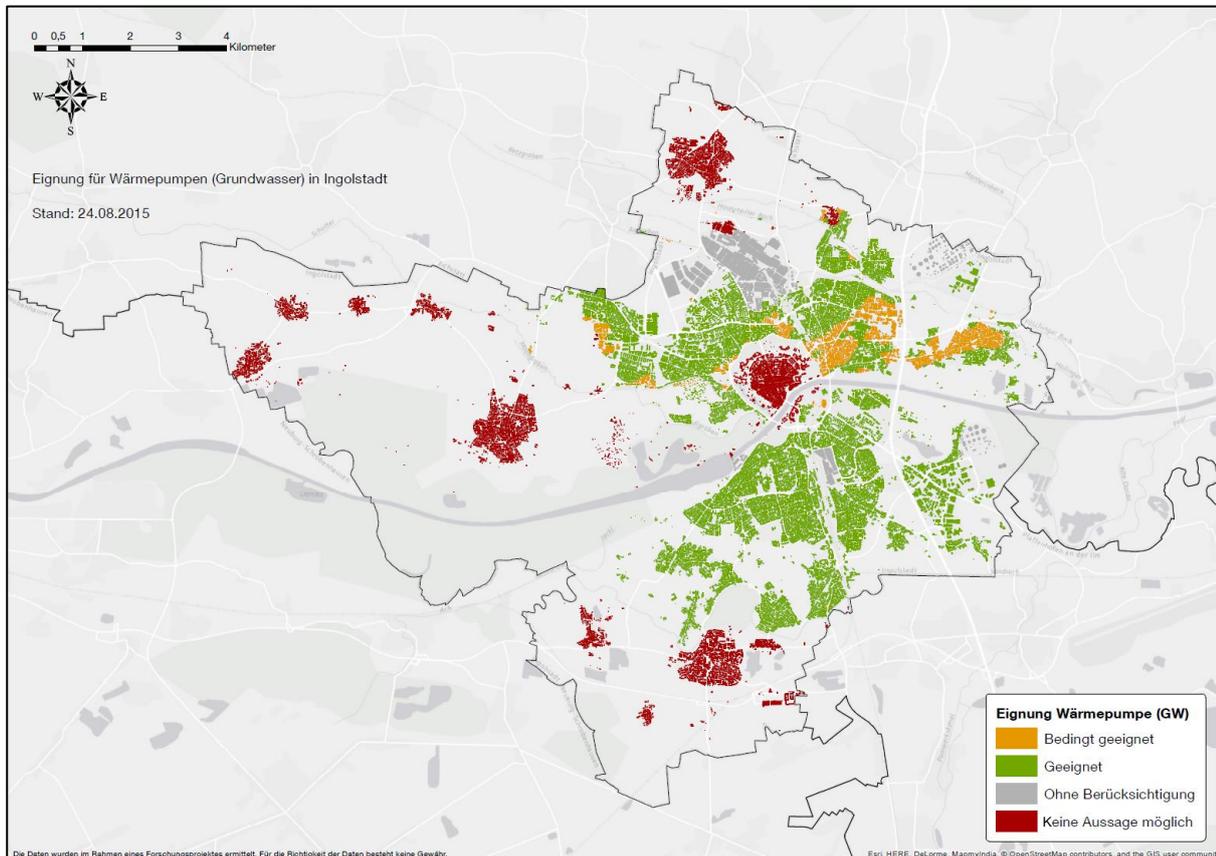


Abbildung 5.37: Prinzipielle Eignung von Gebäuden für Grundwasser-Wärmepumpen in Ingolstadt auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten [101]

Grundsätzlich stellen Wärmepumpen gerade für Neubauten mit geringerem Energieverbrauch durch bessere Isolierungen eine interessante Alternative zu konventionellen Heizsystemen dar. Aber auch Bestandsgebäude können theoretisch auf die notwendigen Niedrigtemperatursysteme umgerüstet werden.

Neben Grundwasserwärmepumpen können Wärmepumpen auch in Kombination mit Flächenkollektoren betrieben werden. Dabei ist der Flächenverbrauch jedoch um ein Vielfaches größer. Als Kriterium für die Eignung eines Gebäudes verwendet die Analyse die Relation aus Energienutzfläche und bebauter Grundstücksfläche, analog der Vorgehensweise bei der Untersuchung Frankfurts. Die Unterscheidung zwischen

geeigneten und ungeeigneten Objekten orientiert sich erneut an der definierten Wirtschaftlichkeitsgrenze von 200 kWh/(m² a).

Die für Ingolstadt ermittelte theoretische Eignung für Wärmepumpen unter Einsatz von Flächenkollektoren auf Gebäudeebene ist in **Abbildung 5.38** visualisiert. Von einer Eignung ausgenommen sind Gebäude, für die eine Nutzung von Klein-BHKW-Anlagen in Frage kommt oder die in einem Fernwärmegebiet liegen.

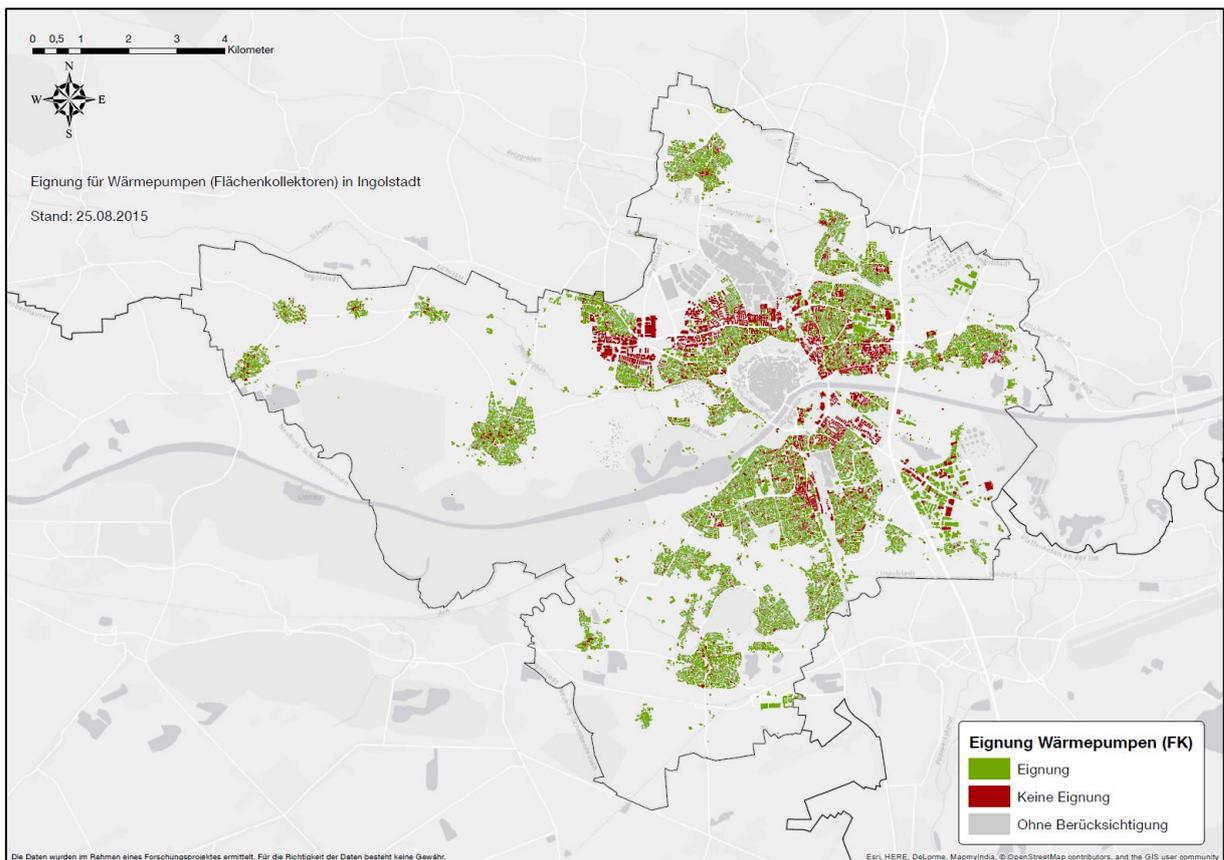


Abbildung 5.38: Theoretische Eignung von Gebäuden für Wärmepumpen (Flächenkollektoren) in Ingolstadt [101]

Es zeigt sich, dass vor allen Dingen Ein- und Zweifamilienhäuser im ländlicheren Bereich sowie am Stadtrand für die Nutzung von Wärmepumpen geeignet sind. Wird unterstellt, dass alle Gebäude einer Vollsanierung unterzogen wurden und eine Untergrenze des spezifischen Heizwärmebedarfs erreichen, ergibt sich ein Potential für die Wärmebedarfsdeckung von 670 GWh/a. Die volle Ausnutzung dieses Potentials führt zudem unter Anwendung typischer Parameter für Wärmepumpen zu einem zusätzlichen Strombedarf von ca. 190 GWh/a. Dies resultiert in einer Vermeidung lokaler Emissionen und bei Substitution von konventionellen Heizungen (z. B. Gas-, Ölheizungen etc.) in deutlichen CO₂-Einsparungen (z. B. bei Gasheizungen: 163 kt/a).

Zusammenfassend ergeben sich für Ingolstadt deutliche Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Hinblick auf die derzeitige und zukünftige Energieinfrastruktur sowie die zukünftige Rolle von Elektrofahrzeugen [101]:

Die Untersuchung des Windpotentials hat gezeigt, dass unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, politischen und umweltrechtlichen Rahmenbedingungen keine geeigneten Flächen für Großwindanlagen vorhanden sind. Eine Nutzung von Kleinwindanlagen kann nicht ausgeschlossen werden und ist zu prüfen. Genau wie die Windkraft-Thematik wird auch das Thema Biomasse zukünftig eine eher untergeordnete Rolle spielen. Verglichen mit der Energienachfrage ist deren Potential als vergleichsweise gering einzustufen. Das Wasserkraftpotential ist nahezu vollständig ausgeschöpft, wobei der gesamte vom Laufwasserkraftwerk erzeugte Strom als Bahnstrom Anwendung findet. Im Bereich der Ingolstädter Fernwärmeversorgung ist noch auszuschöpfendes Potential vorhanden. Zukünftig könnte eine Nachverdichtung des bestehenden Fernwärmenetzes sinnvoll sein, um die Emissionen innerhalb der Stadt weiter zu reduzieren. Dies ist jedoch mit konkurrierenden Maßnahmen (z. B. Klein-BHKW-Anlagen) abzustimmen.

Auch die Geothermie wird zukünftig keine entscheidende Rolle für die Energieversorgung in Ingolstadt spielen. Es besteht jedoch für Wärmepumpen (Flächenkollektoren) ein relativ hohes Potential. Bei Neubauten von Ein- und Zweifamilienhäusern z. B. in Gebieten ohne Gasanschluss kann diese Technologie eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Ein signifikantes Potential für Wärme- und Stromerzeugung liefern Klein-BHKW-Anlagen in größeren Wohngebäuden in Ingolstadt. Aber auch hier sind die Wechselwirkungen mit Fernwärmeausbau und Sanierungsmaßnahmen in die Überlegungen miteinzubeziehen.

Die Untersuchungen zur Sonnenenergie in Ingolstadt haben gezeigt, dass die Nutzung von PV-Technologien ein hohes Potential birgt und vielfältige Perspektiven bietet. Derzeit zählt Ingolstadt zu den führenden Städten Deutschlands, was die Nutzung von Photovoltaik angeht. Das verbleibende noch auszuschöpfende Potential auf den Ingolstädter Dächern ist ebenfalls als sehr hoch einzuschätzen. Dies stellt gerade für Städte wie Ingolstadt eine interessante Möglichkeit dar, langfristig gekoppelte Konzepte aus erneuerbaren Energien und neuartigen Verbrauchern wie z. B. Elektrofahrzeugen in das Energiesystem zu integrieren. Neben dem hohen PV-Potential ist die große Zahl täglicher Berufseinpender in das Ingolstädter Stadtgebiet hervorragend dazu geeignet, Elektrofahrzeuge zu betreiben, die untertags an den großen Firmenparkplätzen in Ingolstadt mit PV-Strom geladen werden, um die auftretende PV-Spitze abzufedern.

5.3 Ländliche Gemeinde Schöllnach

Die Gemeinde Schöllnach stellt als ländlich geprägtes Untersuchungsgebiet das vierte Fallbeispiel dar. Da das gesamte Gemeindegebiet eine Vielzahl von kleineren Ortschaften umfasst, wird der Kernort Schöllnach als zentraler Untersuchungsort ausgewählt.

5.3.1 Ergebnisse der empirischen Analysen

Zur Bestimmung der Charakteristiken in Bezug auf die Mobilitätsstruktur sowie das Verkehrs- und Parkraumverhalten der Gemeinde Schöllnach sind mehrere empirische Untersuchungen durchgeführt worden. Zum einen konnten durch Objektzählungen von parkenden Pkw innerhalb des Kernortes Schöllnach Erkenntnisse zum Parkverhalten in Schöllnach und somit übertragen auch in ländlichen Regionen gewonnen werden. Zum anderen lieferte eine fragebogenbasierte Mobilitätsumfrage Erkenntnisse über die Pkw-Nutzung innerhalb der Gemeinde. In den folgenden Ausführungen werden die Ergebnisse für die Stichprobe ausgewertet und Tendenzen beschrieben.

5.3.1.1 Mobilitätsverhalten und Kenngrößen

Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die empirische Analyse der allgemeinen Mobilitätsstruktur der Marktgemeinde Schöllnach als ländlich geprägte Untersuchungsregion (auf Basis der aus der Stichprobe abgeleiteten Ergebnisse). Zu Beginn erfolgt die Darstellung und Diskussion allgemeiner zentraler Mobilitätsgrößen. Anschließend wird kurz auf die räumliche und die zeitliche Dimension des Mobilitätsverhaltens der ausgewählten Gemeindebevölkerung Bezug genommen.

Tabelle 5.4 fasst die Kennwerte zur Mobilitätsstruktur der untersuchten Bevölkerungsteilmenge der Gemeinde zusammen.

Tabelle 5.4: Zentrale Mobilitätskenngrößen der Gemeinde Schöllnach basierend auf der gezogenen Stichprobe

<i>Kenngröße für Stichprobe</i>	<i>Wert/Umfrageergebnis</i>
Anzahl Wege gesamt [Wege/Tag]	480
Mittlere Wegezahl [Wege/Person/Tag]	2,5
Mittlere Weglänge [km/Weg]	18,7
Tagesstrecke [km/Person/Tag]	47,3

Pro Tag legt jede in der Stichprobe enthaltene Person durchschnittlich 2,5 Wege zurück. Bezugnehmend auf mobile Personen, die mindestens einmal am Tag das Haus verlassen und somit an der Mobilität teilnehmen, dürfte der Wert sehr wahrscheinlich wesentlich höher liegen. Für das Jahr 2008 ergeben sich im deutschen Durchschnitt 3,4 Wege pro Person und Tag. Bei alleiniger Betrachtung der mobilen Personen erhöht sich die mittlere Wegezahl für Deutschland auf rund 4. Dies ist sowohl in Kernstädten als auch in ländlichen Kreisen gleichermaßen festzustellen. [75] Die mittlere Weglänge der befragten Bevölkerung beträgt 18,7 km, was einer Tagesstrecke von 47,3 km/Person gleichkommt.

Ein wichtiges Element zur Beschreibung der Zusammensetzung des Personenverkehrs bildet der Modal Split. Im Falle des Verkehrsaufkommens wird damit die Anzahl der zurückgelegten Wege beschrieben. Unter Berücksichtigung der Verkehrsleistung sind dies die dabei insgesamt zurückgelegten Kilometer. Für die Teilnehmer der Befragung zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Modal Splits vom motorisierten Individualverkehr (als Fahrer und Mitfahrer) – für das Verkehrsaufkommen ergibt sich ein Anteil von mehr als 83 %, für die Verkehrsleistung ein Anteil von knapp 90 %. Beim Verkehrsaufkommen folgen dem Anteil der zu Fuß durchgeführten Wege der öffentliche Personenverkehr (ÖPV) sowie das Fahrrad mit sehr geringen Anteilen. Grund dafür sind die relativ niedrige Siedlungs- und Bevölkerungsdichte und die damit verbundene unzureichend ausgebaute öffentliche Verkehrsinfrastruktur sowie das rückläufige Angebot. Die Zusammensetzung der Verkehrsleistung folgt grundsätzlich der Zusammensetzung des Modal Splits für das Verkehrsaufkommen. Hier zeigt sich, dass knapp neun von zehn Kilometern im motorisierten Individualverkehr (Pkw) zurückgelegt werden. Dies unterstreicht nochmals die Wichtigkeit des Pkw in ländlichen Räumen. Die mit dem Fahrrad oder zu Fuß erbrachten Personenkilometer sind zu vernachlässigen und fallen kaum ins Gewicht. Der Beitrag des öffentlichen Personenverkehrs zu den täglich zurückgelegten Personenkilometern resultiert weitestgehend aus Schul- und Ausbildungswegen. Insgesamt sind diese Ergebnisse typisch für den ländlichen Raum. Bezogen auf die Grundgesamtheit kann deshalb von ähnlichen Tendenzen ausgegangen werden.

Die Auswertung der Daten zeigt ferner, dass für die gezogene Stichprobe sowohl das Verkehrsaufkommen als auch die Verkehrsleistung hinsichtlich der Wegezwecke wesentlich vom Zweck der Arbeit beeinflusst werden. So werden 46 % der von der untersuchten Bevölkerungsteilmenge zurückgelegten Wege pro Tag aus Gründen der Arbeit und Ausbildung durchgeführt. 23 % der täglichen Wege entfallen auf Freizeitaktivitäten, gefolgt vom (täglichem) Einkauf. Wege für Dienstreisen fallen kaum bis

wenig an, private Erledigungen zählen 8 %. Dieses Verhalten unterscheidet sich im Vergleich zu bundesdeutschen Durchschnittswerten deutlich. Im deutschen Durchschnitt verlassen die Personen das Haus am häufigsten, um ihrer Freizeit nachzugehen (32 %). Der Zweck Arbeit folgt erst an dritter Stelle nach dem Einkauf [75]. Analog zum Verkehrsaufkommen entfällt der Großteil der täglich von den befragten Personen zurückgelegten Kilometer auf die Zwecke Arbeit und Ausbildung (54 %), da der Pkw-Verkehr im Gegensatz zu urbanen Strukturen zum Teil auch überregionales Verhalten zeigt. Dem Wegezweck Freizeit kommt auch hier mit 20 % die zweithöchste Bedeutung zu. Aufgrund der vergleichsweise langen Distanzen für Reisen dienstlicher Natur steht dieser Wegezweck an dritter Position. Die zurückgelegten Kilometer in Bezug auf Einkäufe sind aufgrund des Vorhandenseins zahlreicher Einkaufsmöglichkeiten innerhalb Schöllnachs als gering einzustufen.

Abbildung 5.39 zeigt als Zusammenfassung der vorausgegangenen Beschreibungen den kombinierten Modal Split für die Stichprobe differenziert nach Wegezwecken und Verkehrsmitteln.

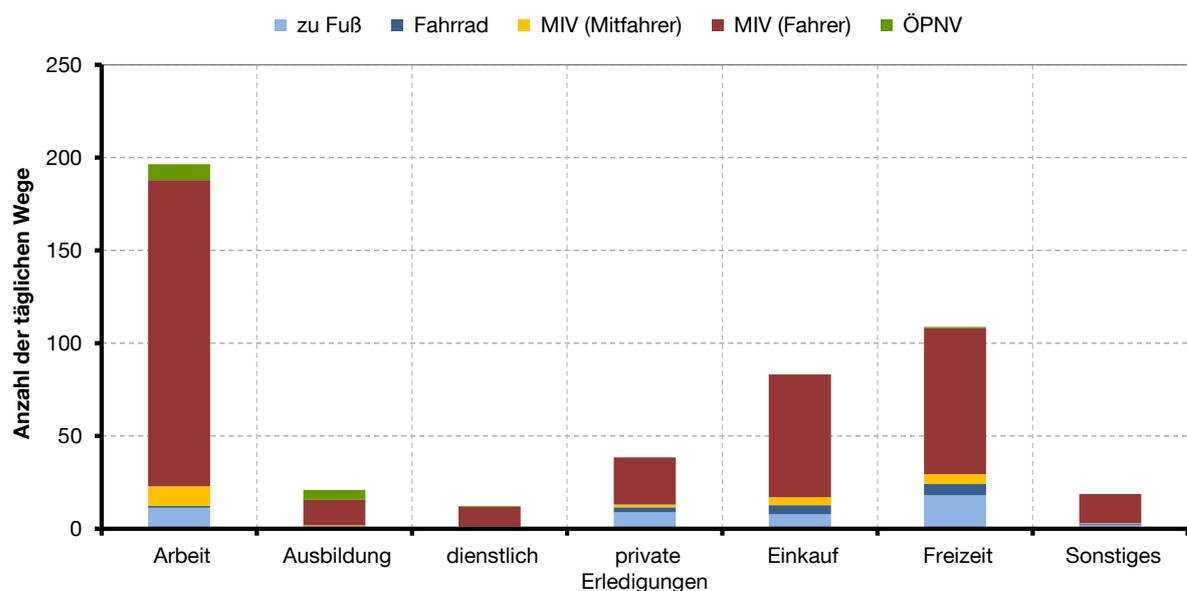


Abbildung 5.39: Kombiniertes Modal Split der gezogenen Stichprobe

Generell ist die hohe Bedeutung des motorisierten Individualverkehrs in sämtlichen Wegezwecken hervorzuheben. Ein relevanter Anteil des öffentlichen Personenverkehrs an den Gesamtwegen ist lediglich für Arbeits- und Ausbildungswege der befragten Personen festzustellen. Für private Erledigungen innerhalb der Gemeinde (Kernort), Einkäufe oder Freizeitaktivitäten spielen neben der Nutzung des Pkw als Fahrer oder Mitfahrer häufig auch Fußwege oder der Einsatz des Fahrrades für die Befragten eine Rolle.

Im Jahr 2014 verzeichnete das Kraftfahrtbundesamt in der Gemeinde Schöllnach 2.928 registrierte Pkw [99]. Der Motorisierungsgrad beträgt damit 611 Pkw je 1.000 Einwohner. Diese Zahl ist verhältnismäßig hoch und vergleichbar mit dem für Ingolstadt ermittelten Motorisierungsgrad (Ingolstadt: ca. 700 Pkw pro 1.000 Einwohner, Frankfurt am Main: ca. 450 Pkw pro 1.000 Einwohner).

Die erhobenen Daten lassen es darüber hinaus zu, Aussagen zur Zahl der vorhandenen Pkw zu treffen. Lediglich 4 % der befragten Haushalte in Schöllnach besitzen keinen Pkw. Gesamtdeutschland betreffend liegt dieser Wert mit 18 % sehr viel höher [75]. Während 42 % der Haushalte aus der Stichprobe einen Pkw besitzen, ist die Zahl der Haushalte mit zwei Pkw annähernd genauso groß. 16 % können sogar über drei oder mehr Pkw verfügen. Das Haushaltseinkommen sowie die Einkommensverhältnisse sind hier nicht berücksichtigt, haben aber wesentlichen Einfluss sowohl auf den Teil der Haushalte, die über einen Pkw verfügen können, als auch auf die Anzahl der Pkw im Haushalt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen städtischen und ländlichen Siedlungsstrukturen ist im Besitz von privaten Garagen und Stellplätzen festzustellen. Die steigende Einwohnerzahl eines Ortes geht einher mit einem sinkenden Anteil privater Parkgaragen. Im Durchschnitt sind in kleineren Gemeinden bis 5.000 Einwohner in 95 % der Fälle Parkmöglichkeiten in privaten Garagen (71 %) oder Stellplatzflächen unmittelbar an das eigene Gebäude angrenzend vorhanden (24 %). In Orten mit 20.000 Einwohnern sinkt dieser Wert bereits auf 88 %. [48]

Die Mobilitätsumfrage in der Gemeinde Schöllnach hinsichtlich Parkmöglichkeiten in privaten Garagen zuhause und auf Stellplätzen am Arbeitsplatz hat für die Stichprobe ergeben, dass 87 % der befragten Gemeindehaushalte über eine private Garage oder einen Stellplatz, der bereits mit einem Stromanschluss ausgestattet ist oder ausgestattet werden könnte, verfügen. 56 % sind sogar in der Lage, zwei oder mehr Fahrzeuge privat unterzustellen und gegebenenfalls mit Strom zu versorgen. Am Arbeitsplatz können 64 % der Umfrageteilnehmer eine Garage bzw. einen Stellplatz nutzen. Wie im späteren Verlauf der Arbeit GIS-basierte Ermittlungen von Stellplätzen noch zeigen werden, können etwa 81 % aller Pkw im Kernort in Privatgaragen abgestellt werden.

Räumliche Dimension des Mobilitätsverhaltens

An dieser Stelle erfolgt eine räumliche Auswertung der täglichen Wege der befragten Gemeindebevölkerung zum Zwecke der Arbeit oder Ausbildung sowie gelegentlich durchgeführter Wege für Dienst- oder Fernreisen.

Das Alltagsverhalten hinsichtlich Arbeit und Ausbildung ist in **Abbildung 5.40** visualisiert.

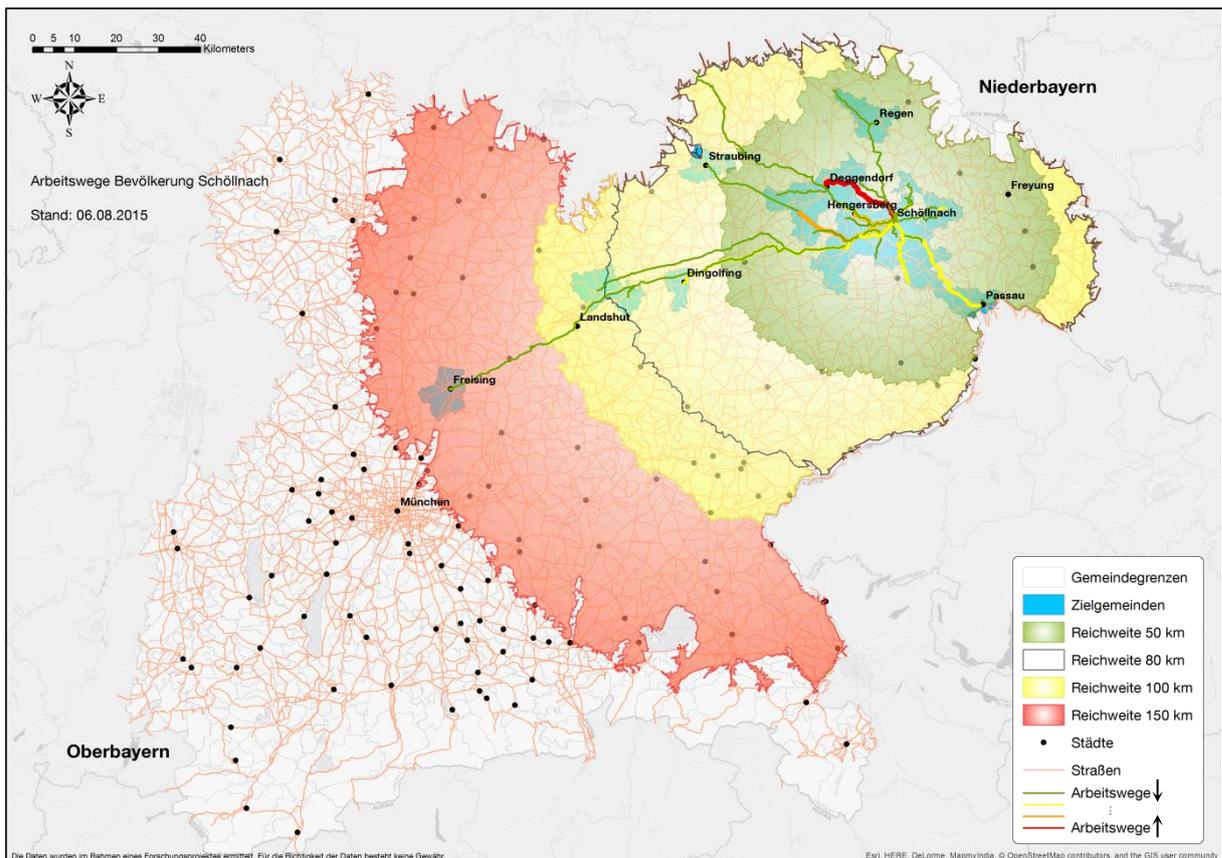


Abbildung 5.40: Mobilitätsverhalten im Alltag (Arbeits- und Ausbildungswege) der befragten Gemeindebevölkerung in Schöllnach

Neben der Ausweisung der Zielgemeinden sind zusätzlich die auf Basis des Straßennetzes errechneten Reichweiten (Ausgangspunkt Schöllnach) für 50 km, 80 km, 100 km sowie 150 km angegeben. Die Linienfarbe repräsentiert die Attraktivität einer Route als Ausbildungs- oder Arbeitsweg. Bis auf wenige Ausnahmen zeigt die Umfrage, dass der Großteil der Arbeits- und Ausbildungsplätze innerhalb eines Radius von 100 km liegt. Die Wege konzentrieren sich aber hauptsächlich auf wenige Ziele in den umliegenden Gemeinden bis etwa 25 bis 30 km Entfernung von Schöllnach. Wege mit einer Länge zwischen 100 und 150 km sind in der Stichprobe kaum zu beobachten. Selbst Fahrten mit 150 km könnten jedoch theoretisch mit heutigen

Elektrofahrzeugen durchgeführt werden (Laden am Arbeitsplatz). Weiter entfernte Arbeitsplätze ergab die Mobilitätsumfrage nicht.

Werden für die gezogene Stichprobe neben den Wegen für Ausbildung und Arbeit sämtliche weitere Wegezwecke und deren Längen herangezogen, lässt sich eine histogrammatische Auswertung der Weglängen durchführen. Diese Auswertung ist in Hinblick auf die Abschätzung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen eine interessante Größe. Die Häufigkeitsverteilung der Weglängen für die befragte Gemeindebevölkerung in Schöllnach zeigt einen deutlichen Überschuss der Weglängen bis 50 km (96 %). Bezogen auf Gesamtdeutschland sind etwa 80 % aller Fahrtstrecken kürzer als 50 km [75]. Insgesamt liegen etwa 40 % aller durch die Stichprobenziehung erfassten Wege innerhalb einer Distanz von 5 km. Diese Betrachtung macht deutlich, dass auch in ländlichen Räumen wie beispielsweise Schöllnach die zurückgelegten Wege größtenteils durch die Reichweiten aktueller Elektrofahrzeuge abgedeckt werden könnten. Die durchschnittliche Reichweite derzeitiger Elektrofahrzeuge liegt bei über 150 km. Die eingeschränkte Reichweite wird jedoch üblicherweise als größtes Hemmnis für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Allgemeinen und insbesondere in ländlichen Regionen angeführt. Dies kann in vorliegender Untersuchung unter Zugrundelegung der befragten Personen nicht bestätigt werden.

Bei der Untersuchung von Weglängen differenziert nach Wegezwecken fallen vor allem innerhalb der Zwecke Ausbildung (maximal 600 km) und Dienstreisen (maximal 500 km) große Ausreißer der Stichprobe nach oben auf, was sich in relativ hohen mittleren Weglängen für die befragte Bevölkerungsteilmenge niederschlägt. Dies ist zum einen auf die nur geringe Zahl erfasster Dienstreisen und zum anderen auf die Erfassung von langen Ausbildungswegen, die nicht täglich, sondern z. B. einmal wöchentlich stattfinden, zurückzuführen. Die in der Stichprobe untersuchte Bevölkerungsteilmenge legt eine mittlere Weglänge von knapp 19 km zurück.

Zur besseren Einordnung und Interpretation der Ergebnisse aus der Stichprobe erfolgt in **Abbildung 5.41** ein Vergleich der ermittelten durchschnittlichen Weglängen mit den gesamtdeutschen Mittelwerten.

Die Differenz der Mittelwerte aller Wege aus der Stichprobe und Deutschland (Gesamtweglänge) beträgt 6,5 km. Grundsätzlich kann aufgrund fehlender Einrichtungen auf dem Land im Vergleich zu städtischen Strukturen von einer etwas höheren durchschnittlichen Gesamtweglänge ausgegangen werden (dies dürfte tendenziell auch auf die Ergebnisse für die Grundgesamtheit zutreffen). Die mittleren Weglängen

für die Zwecke Arbeit, private Erledigungen und Einkauf unterscheiden sich nicht übermäßig voneinander. Eine niedrigere Dichte an Schulen und Ausbildungseinrichtungen führt tendenziell zu höheren mittleren Wegen auf dem Land für Ausbildungszwecke im Vergleich zum deutschen Durchschnitt. Wie erläutert, ist an dieser Stelle auf die Problematik der unzureichenden Datengrundlage hinzuweisen (Ausreißer).

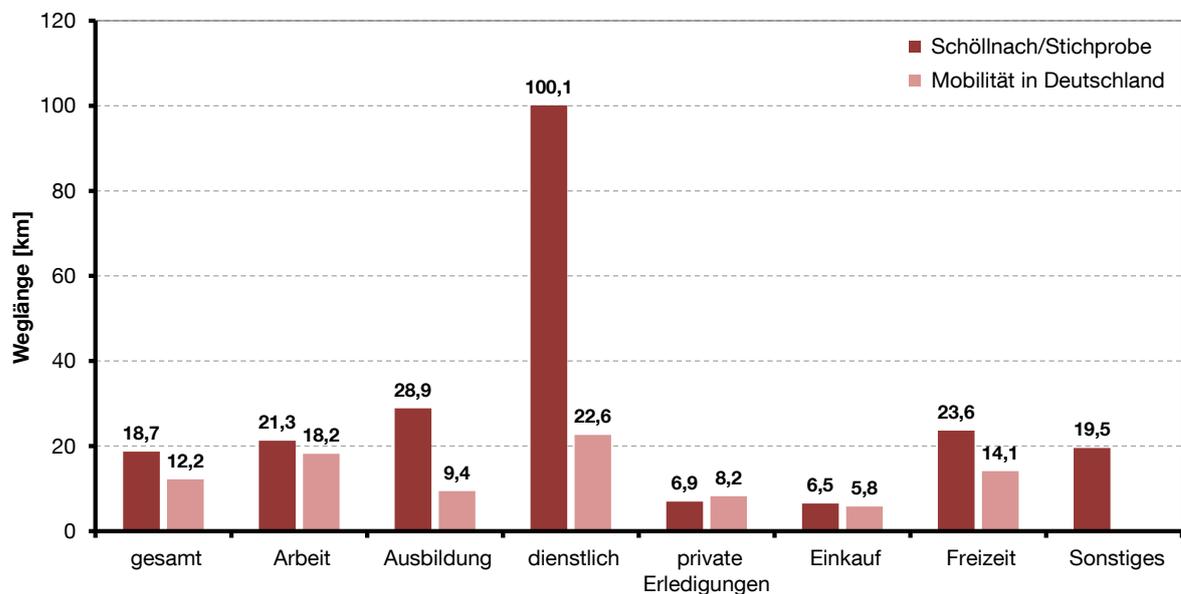


Abbildung 5.41: Weglängen der Schöllnacher Stichprobe differenziert nach Wegezwecken im Vergleich zu deutschen Mittelwerten (Daten: [75])

Die Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen werden neben dem Alltagsverhalten, wie z. B. für Fahrten zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz, auch wesentlich vom Reiseverhalten der Fahrzeugnutzer, sowohl dienstlicher als auch privater Natur, beeinflusst. Das Fernreiseverhalten der befragten Gemeindebevölkerung wird in **Abbildung 5.42** visualisiert und kurz beschrieben.

Es handelt sich bei den abgebildeten Reisen um Dienst- und Urlaubsreisen, die von den befragten Teilnehmern innerhalb von zwei Kalendermonaten durchgeführt worden sind. Die entsprechenden Daten wurden mittels der fragebogenbasierten Umfrage erhoben. Dabei wird zwischen den Verkehrsmitteln Pkw, Bus, Bahn und Flugzeug unterschieden. Ferner sind die Reichweiten ausgehend vom Ort Schöllnach für die Distanzen 100 km, 300 km, 500 km und 800 km angegeben.

Es kann festgestellt werden, dass das Gros der Fernreisen im Distanzbereich zwischen 200 und 800 km zu liegen kommt. Um die Attraktivität von Elektrofahrzeugen zukünftig auch für längere Reisen zu steigern, bedarf es innovativer Konzepte zum

Einsatz der Elektromobilität für Fernreisen (z. B. Schnellladestationen entlang von Fernverkehrsstraßen).

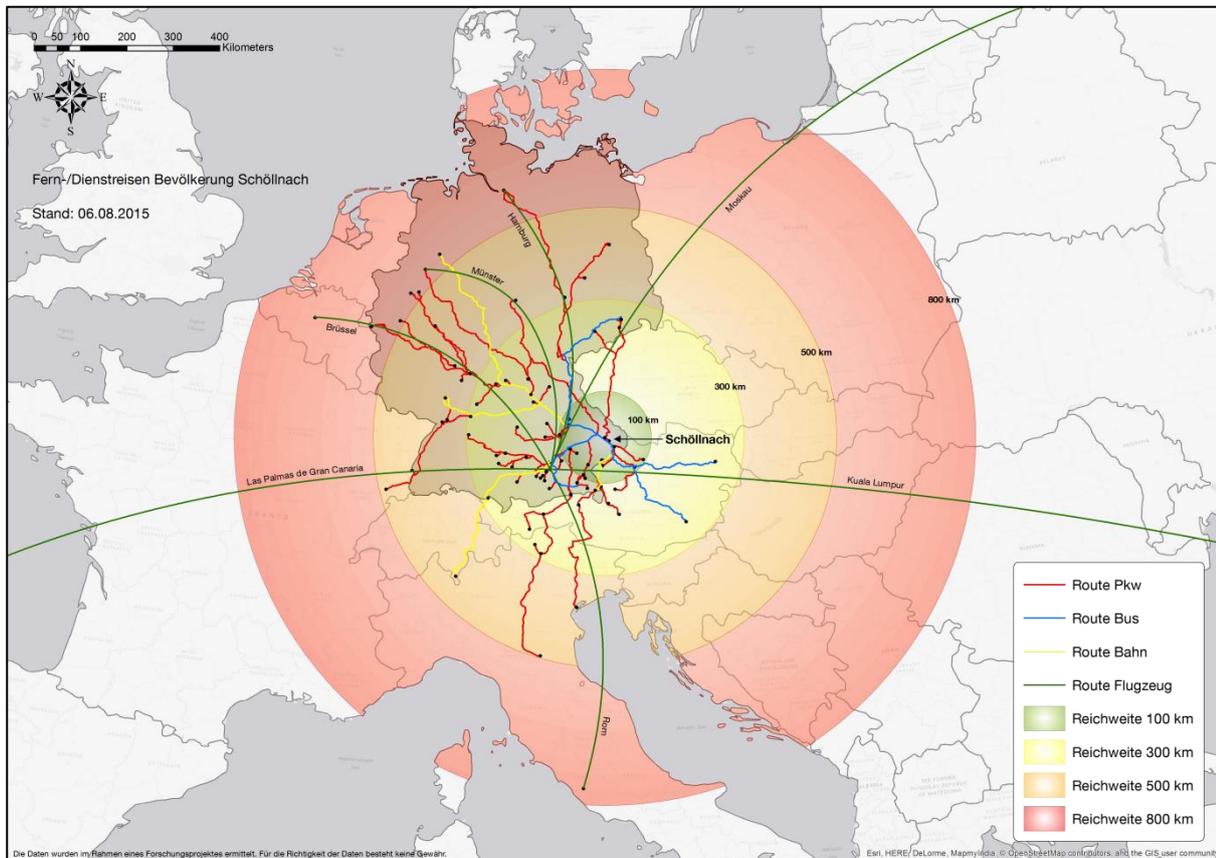


Abbildung 5.42: Fern- und Dienstreiseverhalten der befragten Gemeindebevölkerung in Schöllnach

Zeitliche Dimension des Mobilitätsverhaltens

Die durchgeführte Umfrage erlaubt es, neben der räumlichen Dimension des Mobilitätsverhaltens auch die zeitliche Dimension – zumindest für die zurückgelegten Arbeits- und Ausbildungswege der in Schöllnach befragten Personen – in den folgenden Erläuterungen kurz zu betrachten. Die vorausgegangenen Auswertungen haben gezeigt, dass für die Mehrheit der Befragten für die Zwecke Arbeit und Ausbildung in der Hauptsache der motorisierte Individualverkehr bzw. der Pkw entweder als Fahrer oder Mitfahrer zum Einsatz kommt.

Die Wegestartwahrscheinlichkeiten für Wege zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz und nach Hause sind (für die Stichprobe) in **Abbildung 5.43** zusammengefasst.

Die Verteilung weist charakteristische Merkmale auf und orientiert sich an den Tagsgängen im deutschen Durchschnitt. Der Verkehr zeigt zwei ausgeprägte Spitzen innerhalb von 24 Stunden (morgens und spätnachmittags), wenn die Bevölkerung

die Fahrt zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz antritt oder diesen wieder für den nach Hause-Weg verlässt. In den frühen Nachmittagsstunden fallen hauptsächlich nach Hause-Fahrten von Schülern und Auszubildenden auf. In der restlichen Tageszeit werden kaum Fahrten zum Zwecke der Arbeit bzw. der Ausbildung unternommen.

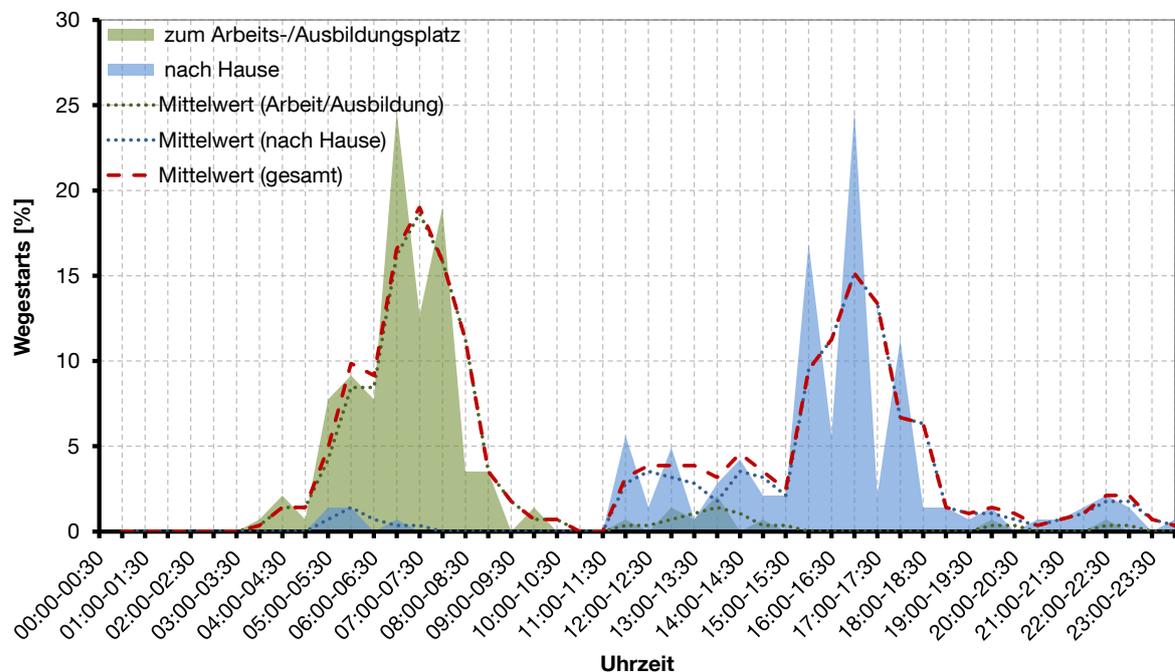


Abbildung 5.43: Wegestarts für Arbeits- und Ausbildungswege der in der Stichprobe enthaltenen Personen

Vor dem Hintergrund der Bestimmung von Elektromobilitätspotentialen ist die Verteilung der Standzeiten am Arbeits- oder Ausbildungsplatz für die täglich genutzten Pkw oder Zweiräder von Interesse. Unter Zugrundelegung der Daten aus der Stichprobe lässt sich die Parkdauer am Arbeits- oder Ausbildungsplatz für die von den Befragten genutzten Pkw oder Zweiräder ermitteln, die im Schnitt 8,5 Stunden beträgt. Für mehr als 63 % der dabei genutzten Fahrzeuge beträgt die Standzeit am Arbeits- oder Ausbildungsplatz zwischen acht und 11 Stunden.

Diese Informationen können genutzt werden, um abschließend Aussagen zum potentiellen Einsatz von Elektrofahrzeugen für Fahrten zum Arbeits- und Ausbildungsplatz für die befragte Gemeindebevölkerung zu treffen. Die aus der Umfrage abgeleiteten Standzeiten für die Fahrzeuge der befragten Nutzer am Arbeits- und Ausbildungsplatz sind in **Abbildung 5.44** eingetragen. Zusätzlich wird angenommen, dass für diese Fahrten ein beispielhaftes Elektrofahrzeug mit einer nutzbaren Batteriekapazität von 18,8 kWh und einem durchschnittlichen Verbrauch von 16 kWh/100 km zum Einsatz kommt.

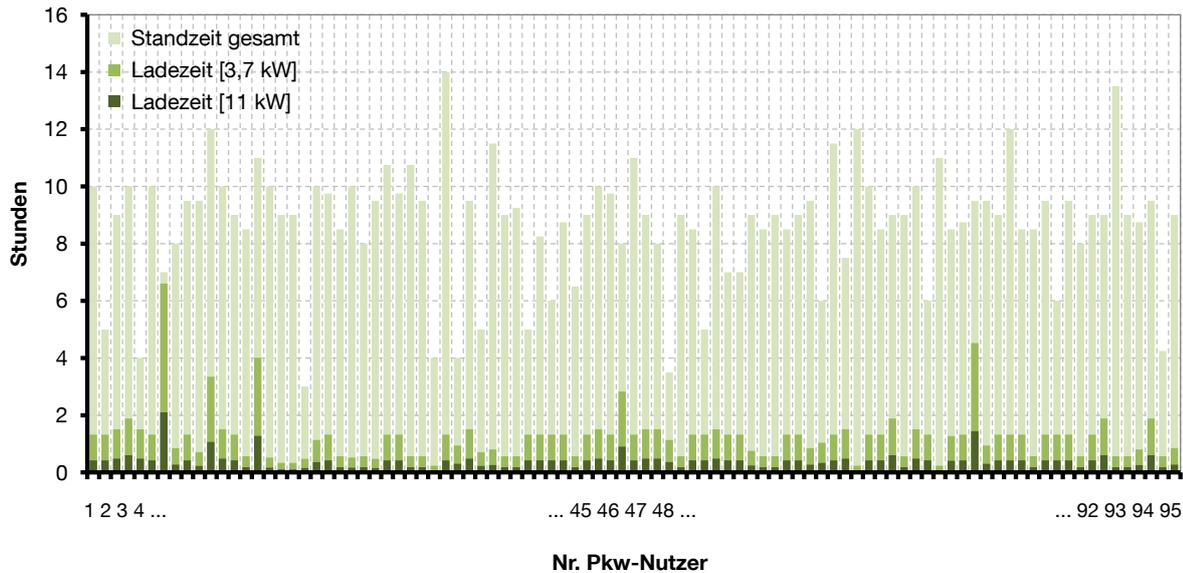


Abbildung 5.44: Standzeit der von den Befragten genutzten Fahrzeuge und beispielhafte Ladezeiten bei Nutzung eines Elektrofahrzeuges für Fahrten zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz

Bis auf zwei befragte Nutzer, deren Ladezeit des Fahrzeuges die Standzeit überschreitet oder für deren Fahrten zum Arbeitsplatz der verfügbare Energieinhalt der Batterie des beispielhaften Elektrofahrzeuges nicht ausreichend ist (in Diagramm nicht enthalten), wäre für die verbleibenden Nutzer der Einsatz eines Elektrofahrzeuges problemlos möglich. Die Standzeiten am Arbeits- oder Ausbildungsplatz sind zur Vollladung der Fahrzeugbatterien ausreichend, selbst bei einer Ladeleistung von nur 3,7 kW (Schutzkontaktsteckdose im Haushalt). Wesentlich kürzere Ladezeiten können durch höhere Ladeleistungen erzielt werden, was eine Vergleichsrechnung mit 11 kW Ladeleistung in Abbildung 5.44 verdeutlicht.

5.3.1.2 Verkehrs- und Parkraumstruktur

Aufgrund der zergliederten Gestaltung des Gemeindegebietes des Marktes Schöllnach ist die Verkehrs- und Parkraumstruktur gänzlich unterschiedlich zu oben behandelten Fallbeispielen. Die zum Gemeindegebiet gehörenden kleineren Ortschaften fließen in diese Untersuchung nicht mit ein. Der Fokus liegt auf dem Kernort Schöllnach. Es ist anzunehmen, dass die Bevölkerung in den umliegenden kleineren Ortschaften aufgrund der geringen Dichte innerhalb dieser Ortschaften sehr wahrscheinlich über einen privaten Stellplatz (z. B. Garage oder Carport) verfügt und dort keine Straßenparker existieren.

Die Ergebnisse der Objektzählung parkender Pkw in den größten Straßen innerhalb des Kernortes Schöllnach fließen in **Abbildung 5.45** ein.

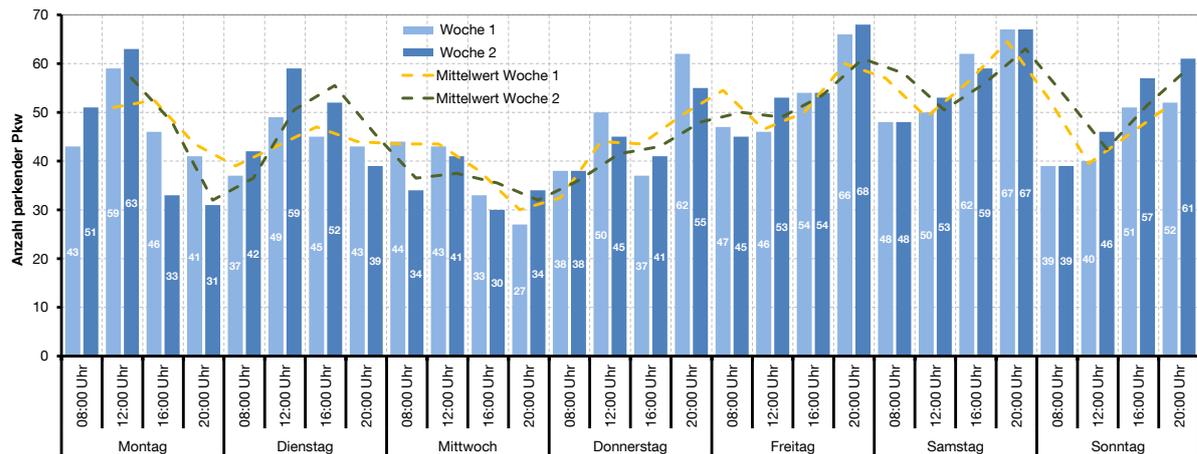


Abbildung 5.45: Anzahl der parkenden Pkw in Schöllnach auf Basis des Gesamtores

Eine detaillierte Darstellung differenziert nach den einzelnen betrachteten Straßen im Kernort erfolgt in **Abbildung 5.46**. Die Anzahl der parkenden Fahrzeuge wurde zu vier verschiedenen Tageszeiten (08:00 Uhr, 12:00 Uhr, 16:00 Uhr sowie 20:00 Uhr) an 14 aufeinanderfolgenden Tagen ermittelt.

Im Verlauf des Untersuchungszeitraumes ist eine gewisse Periodizität festzustellen. Deutlich erkennbar ist die Abnahme der im Kernort Schöllnach auf der Straße oder am Straßenrand abgestellten Pkw von Montag bis Mittwoch. Anschließend erfolgt ein erneuter Anstieg bis Freitag. Der Mittwoch gilt somit als schwächster Werktag in Bezug auf die Anzahl parkender Fahrzeuge. Der Samstag folgt den Ergebnissen des Freitags. Das Niveau des Sonntags ist insgesamt als geringer einzustufen.

Grundsätzlich sind zu Spitzenzeiten im gesamten Ort maximal knapp 70 abgestellte Pkw entlang größerer Straßen zu verzeichnen. In Anbetracht der Einwohnerzahl und der Anzahl zugelassener Fahrzeuge in Schöllnach (ca. 2.900 Pkw im Gemeindegebiet, ca. 2.100 im Kernort) ist diese Zahl vergleichsweise gering. Dies lässt den Schluss zu, dass Parken an Straßen im Allgemeinen keine Option für die Schöllnacher Bevölkerung ist und die Fahrzeuge vorwiegend in privaten Garagen untergebracht sind. Dies bestätigen zudem die Ergebnisse aus der fragebogenbasierten Mobilitätsumfrage, die in Kapitel 5.3.1.1 im Mittelpunkt der Betrachtungen steht. Das resultierende Parkverhalten in Schöllnach lässt sich letztendlich auch auf ähnlich ländlich strukturierte Regionen übertragen.

Das Parkverhalten innerhalb verschiedener Straßenkategorien kann in **Abbildung 5.46** nachvollzogen werden.

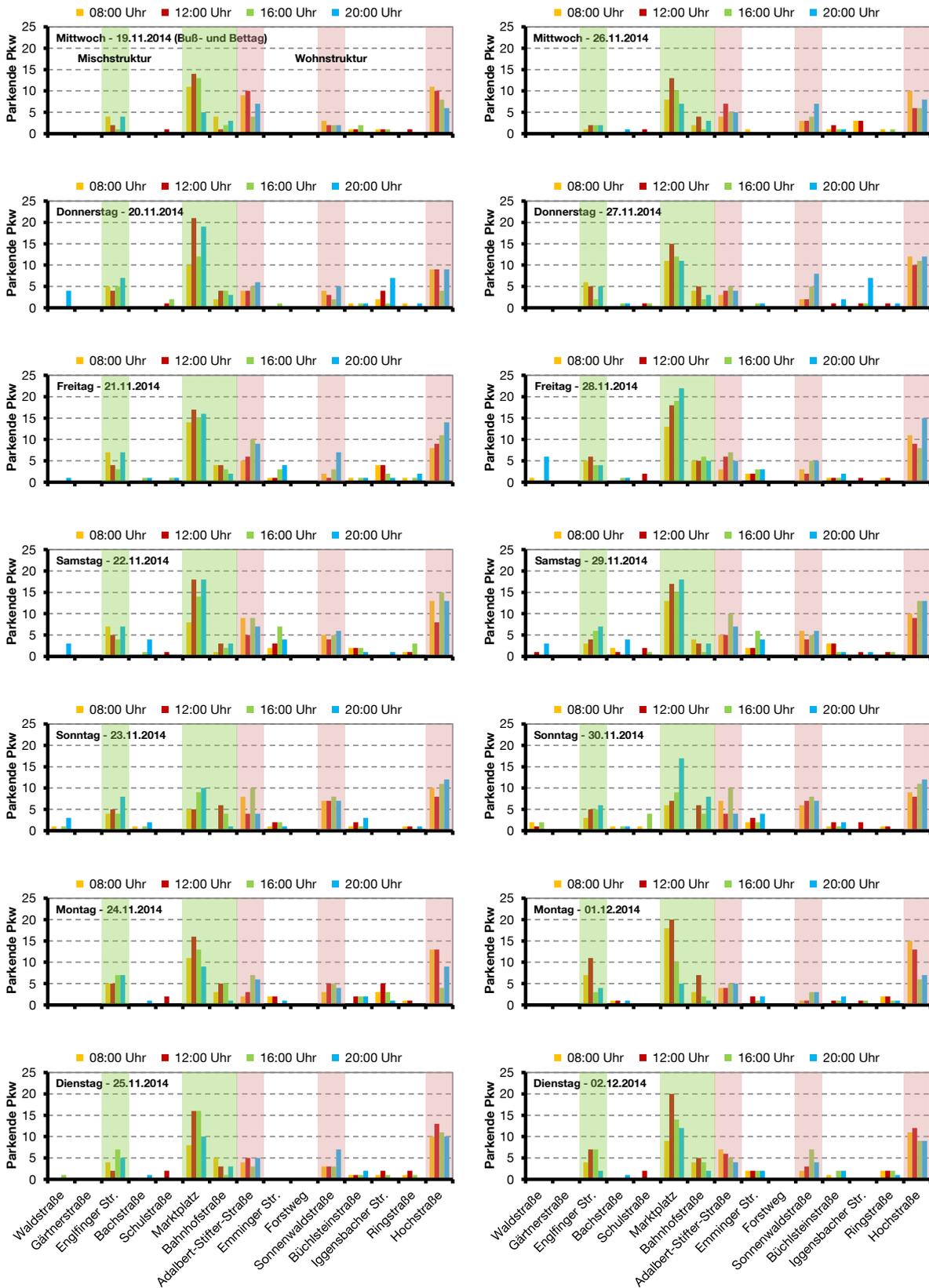


Abbildung 5.46 Ergebnisse der empirisch durchgeführten Parkraumanalyse in Schöllnach differenziert nach Straßen

Während die untersuchten Straßen Adalbert-Stifter-Straße, Sonnenwaldstraße und Hochstraße als typische Straßen mit vorwiegend Wohnstruktur charakterisiert werden können, ist in den Straßen Englfinger Straße, Bahnhofstraße sowie auf dem Marktplatz eine Mischstruktur aus Wohnen, Gewerbe und Handel festzustellen. Wie erwartet, zeigen Wohnstraßen im Prinzip in den Morgen- und in den Abendstunden, bevor die Bevölkerung das Haus verlässt, um einer Arbeit oder Ausbildung nachzugehen sowie nach der Rückkehr nach Hause, die höchste Anzahl an geparkten Pkw entlang des Straßenrandes. Dagegen ist das Maximum an parkenden Fahrzeugen in gemischten Wohn- und Geschäftsstraßen in der Hauptsache in den Morgen- und Mittagsstunden festzustellen.

Exemplarisch weist **Abbildung 5.47** die räumliche Darstellung der empirisch durchgeführten Parkraumanalyse in Schöllnach anhand zweier Untersuchungszeitpunkte aus.

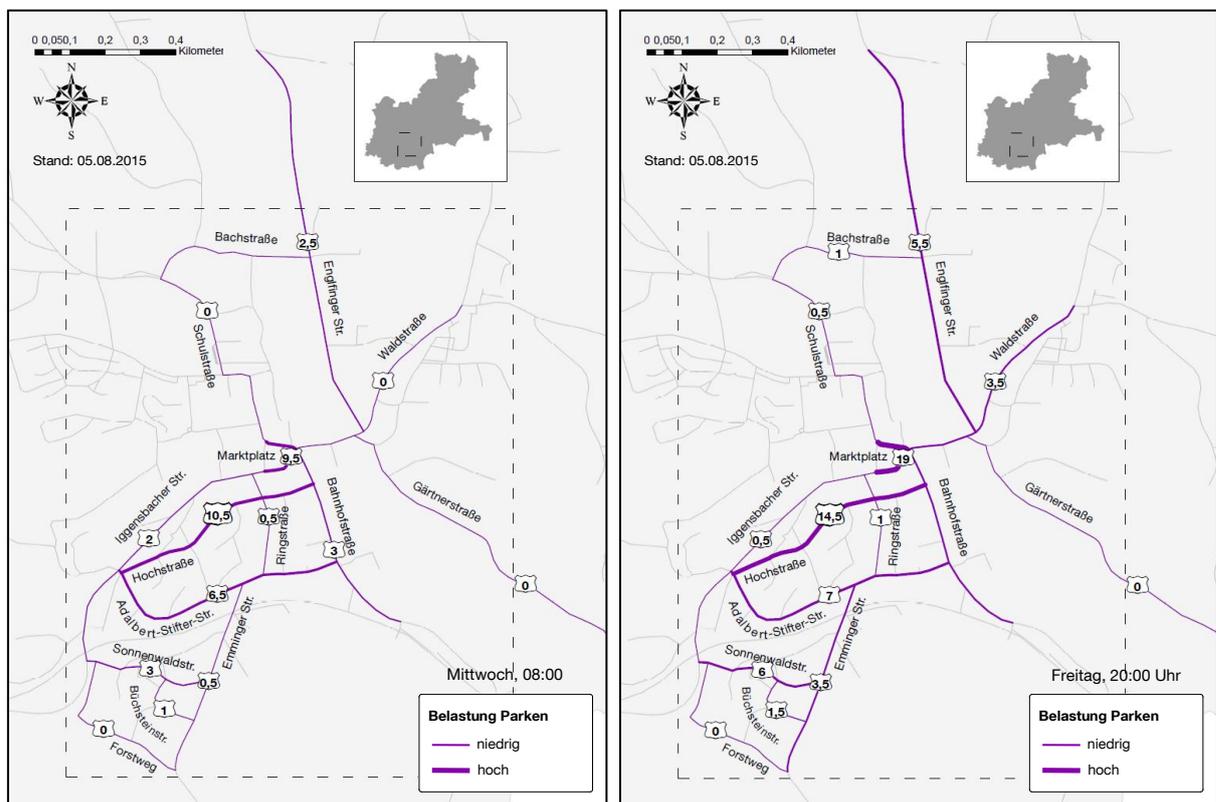


Abbildung 5.47: Räumliche Darstellung der empirisch durchgeführten Parkraumanalyse in Schöllnach anhand zweier Zeitpunkte (Straßendaten: OpenStreetMap)

Ausgewählt wurde jeweils die Situation mit der geringsten bzw. höchsten Anzahl parkender bzw. abgestellter Pkw auf öffentlichen Straßen. Die Liniendicke repräsentiert die Belastung durch abgestellte Fahrzeuge bzw. die ermittelte Anzahl an par-

kenden Pkw. Durchschnittlich ist an einem Mittwoch um 08:00 Uhr die geringste Belastung im Kernort festzustellen, während an einem Freitag um 20:00 Uhr vor allen Dingen Wohnstraßen sowie die Flächen in der Ortsmitte die meisten abgestellten Pkw aufweisen.

Analog zur Vorgehensweise in Frankfurt und Ingolstadt soll in diesem Kapitel auch für die ländliche Gemeinde Schöllnach (Kernort) die Zusammensetzung der Parkplatzstruktur untersucht werden.

Im Jahr 2015 waren insgesamt 2.928 Pkw im gesamten Gemeindegebiet registriert [99]. Aufgrund der Beschränkung der Untersuchung auf den Kernort und Vernachlässigung der umliegenden Ortschaften innerhalb des Gemeindegebietes ist zur Beurteilung der Parkmöglichkeiten eine deutlich reduzierte Anzahl an Pkw zu berücksichtigen. Auch hier ist den veränderlichen Verhältnissen durch den Einfluss von Ein- und Auspendlern Rechnung zu tragen.

Dass Parken auf öffentlichen Parkplatzflächen in kleinen ländlichen Gemeinden keine große Bedeutung hat, zeigt die in **Abbildung 5.48** dargestellte Situation.

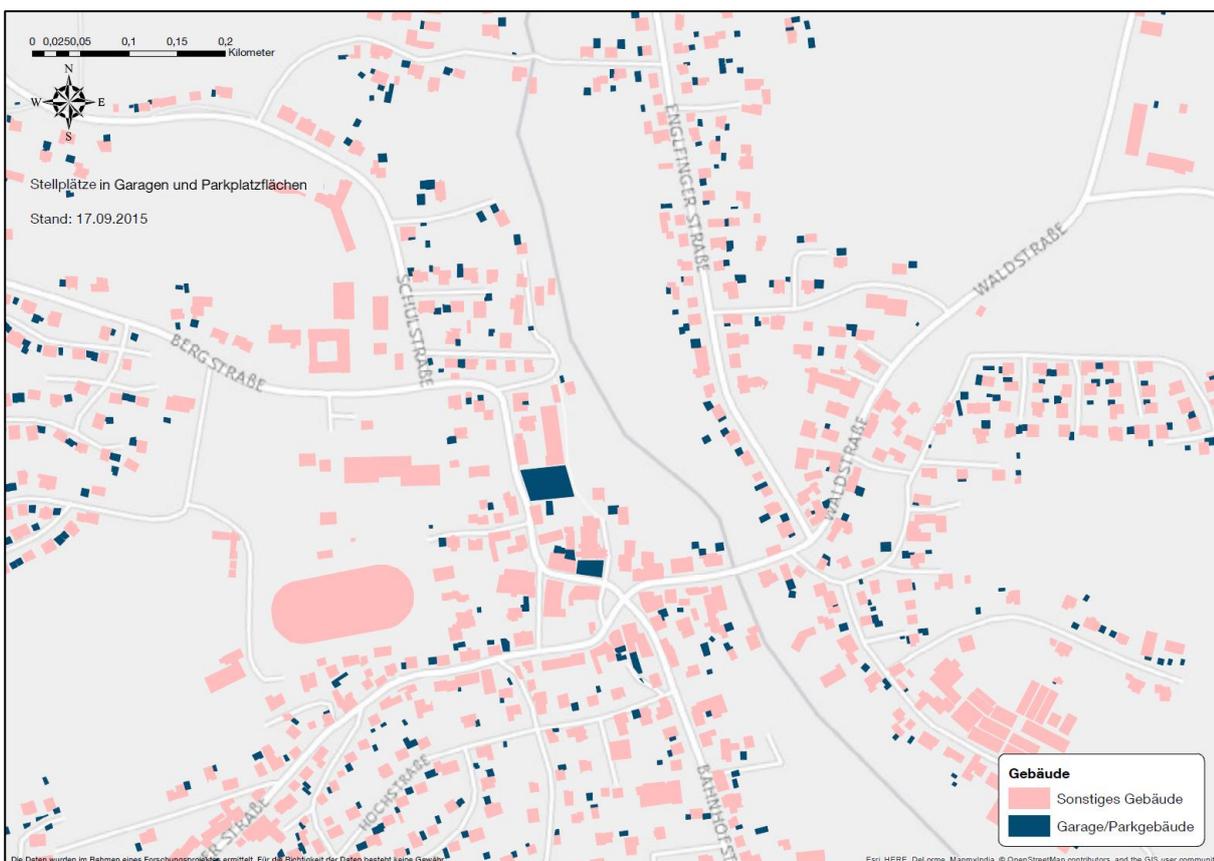


Abbildung 5.48: Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen sowie auf Parkplatzflächen in der ländlichen Gemeinde Schöllnach

Lediglich zwei größere Parkplätze, die öffentlich genutzt werden können, sind im Zentrum des Kernortes vorhanden. Wie allerdings die Objektzählung der parkenden Fahrzeuge gezeigt hat, werden diese Parkplätze vorwiegend als Pendlerparkplätze für Berufsauspendler (mit anschließender Weiterfahrt beispielsweise mit Werksbussen) und Berufseinpendler genutzt sowie von Personen angefahren, die Einkäufe oder Erledigungen im Kernort zu verrichten haben.

Die Gebäudetypologie Schöllnachs ist im Wesentlichen durch Ein- und Mehrfamilienhäuser geprägt, die in den meisten Fällen über eine private Abstellmöglichkeit in Form von Einzel- und Doppelgaragen oder Stellplätzen unmittelbar am Gebäude verfügen. Die in Abbildung 2.12 statistisch aufbereiteten Daten konnten mittels der empirisch durchgeführten Analysen bestätigt werden. So ist die Parkplatzstruktur vorwiegend von privaten Unterbringungsmöglichkeiten geprägt.

Die Bestimmung des dem Kernort zugeordneten Pkw-Bestandes basiert erneut auf der Wohngebäudestruktur des Ortes. Die Analyse der digitalen Geodaten und Anwendung der Methodik führt zur Ermittlung der Bewohner pro Gebäude. Die in 50 x 50 m-Auflösung aufbereitete Bevölkerungsdichte zeigt **Abbildung 5.49**.

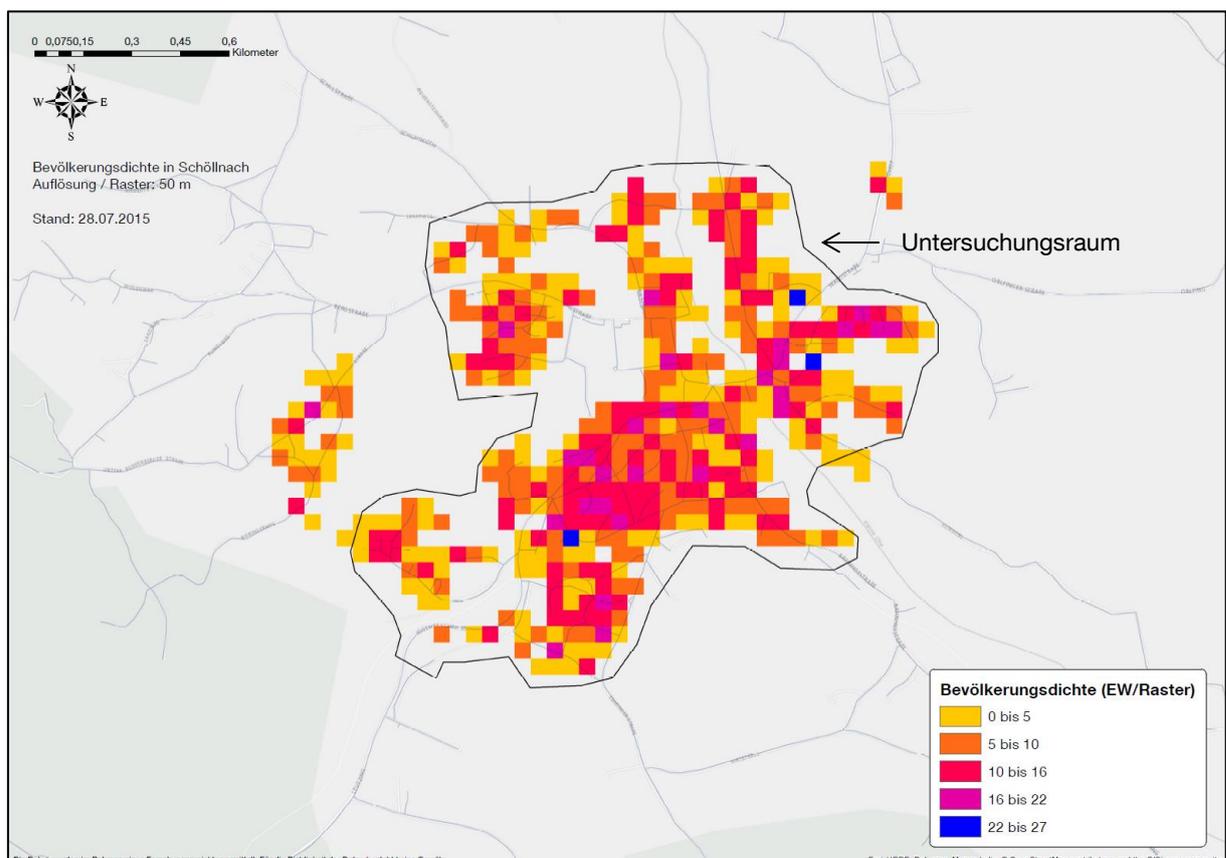


Abbildung 5.49: Bevölkerungsdichte in Schöllnach mit einer Auflösung von 50 m

Grundsätzlich ist der Kernort Schöllnach von einer weitgehend homogen verteilten Bevölkerungsdichte charakterisiert. Im Zentrum des Ortes (Marktplatz) ist die Dichte jedoch als niedrig einzustufen, während vor allen Dingen im Bereich der südwestlich gelegenen Wohnsiedlung höhere Bevölkerungsdichten auftreten (mehrere größere Mehrfamilienhäuser). Insgesamt ist für den Kernort eine Bevölkerungszahl von 3.600 ermittelt worden.

Basierend auf diesen Zahlen ist es im nächsten Schritt möglich, die Anzahl an Pkw sowie die Pkw-Dichte des Ortes zu errechnen. Dazu wird erneut der Motorisierungsgrad für Pkw in Schöllnach herangezogen. Wie für weniger dicht besiedelte und ländlich strukturierte Orte üblich, ist der Motorisierungsgrad mit 0,6 Pkw/Einwohner vergleichsweise hoch. In Frankfurt liegt dieser Wert bei ca. 0,45, während Ingolstadt aufgrund der Zulassung von überdurchschnittlich vielen Firmenfahrzeugen einen noch höheren Wert von 0,7 aufweist.

Die für Schöllnach ermittelte Pkw-Dichte (25 x 25 m-Raster) ist in **Abbildung 5.50** visualisiert.

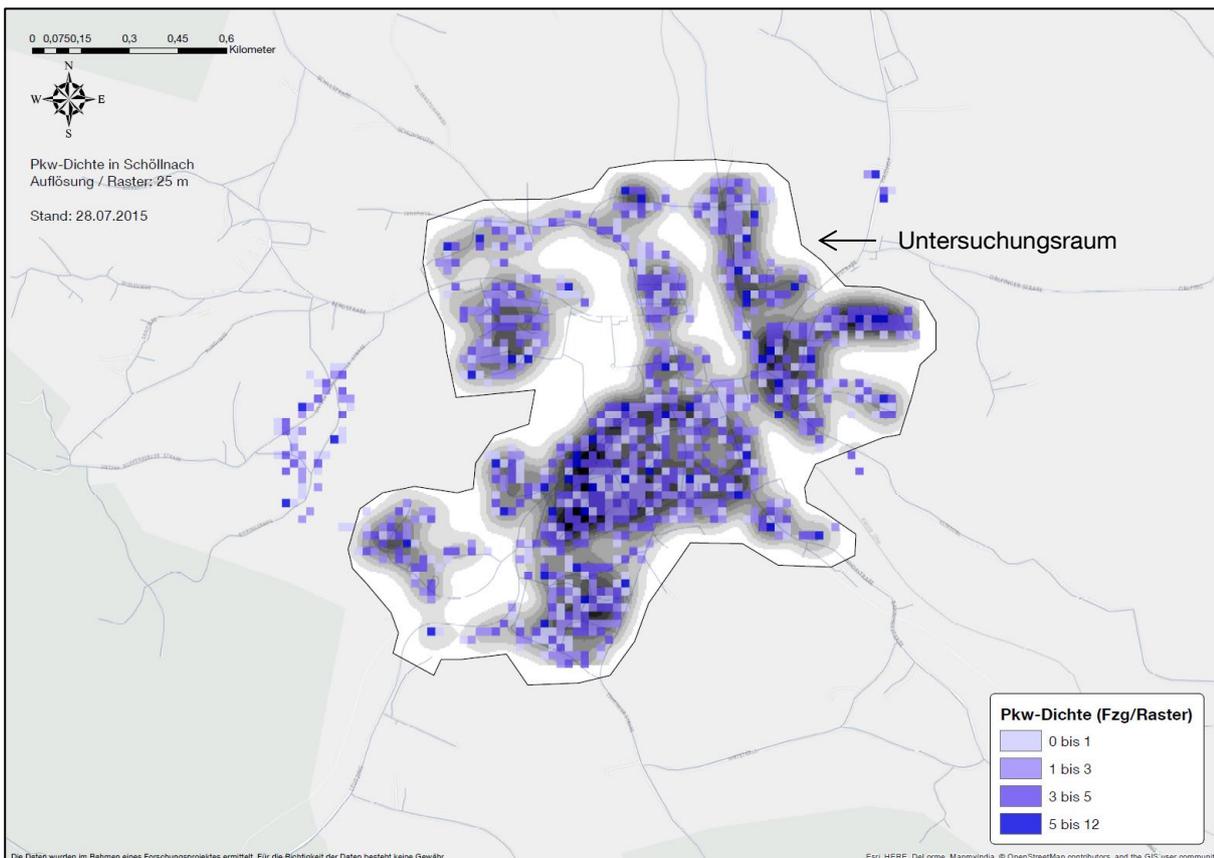


Abbildung 5.50: Pkw-Dichte in Schöllnach mit einer Auflösung von 25 m

Maximal ergibt sich eine Dichte von 12 Pkw pro Rasterzelle. Gesamt betrachtet ergeben die Auswertungen, dass unter Zugrundelegung der ermittelten Bevölkerung im Kernort eine Anzahl von 2.100 Pkw vorhanden ist. Eine exaktere Ermittlung lassen die zur Verfügung stehenden Daten nicht zu. Zudem sind zur Beurteilung der Parkmöglichkeiten von Pkw die zusätzlichen Anteile durch Berufspendler in die Überlegungen miteinzubeziehen.

Wie für die Fallbeispiele Frankfurt am Main und Ingolstadt bereits durchgeführt, wird die Unterbringung aller ermittelten Fahrzeuge allein auf den Straßen innerhalb der Ortschaft bewertet (**Abbildung 5.51**).

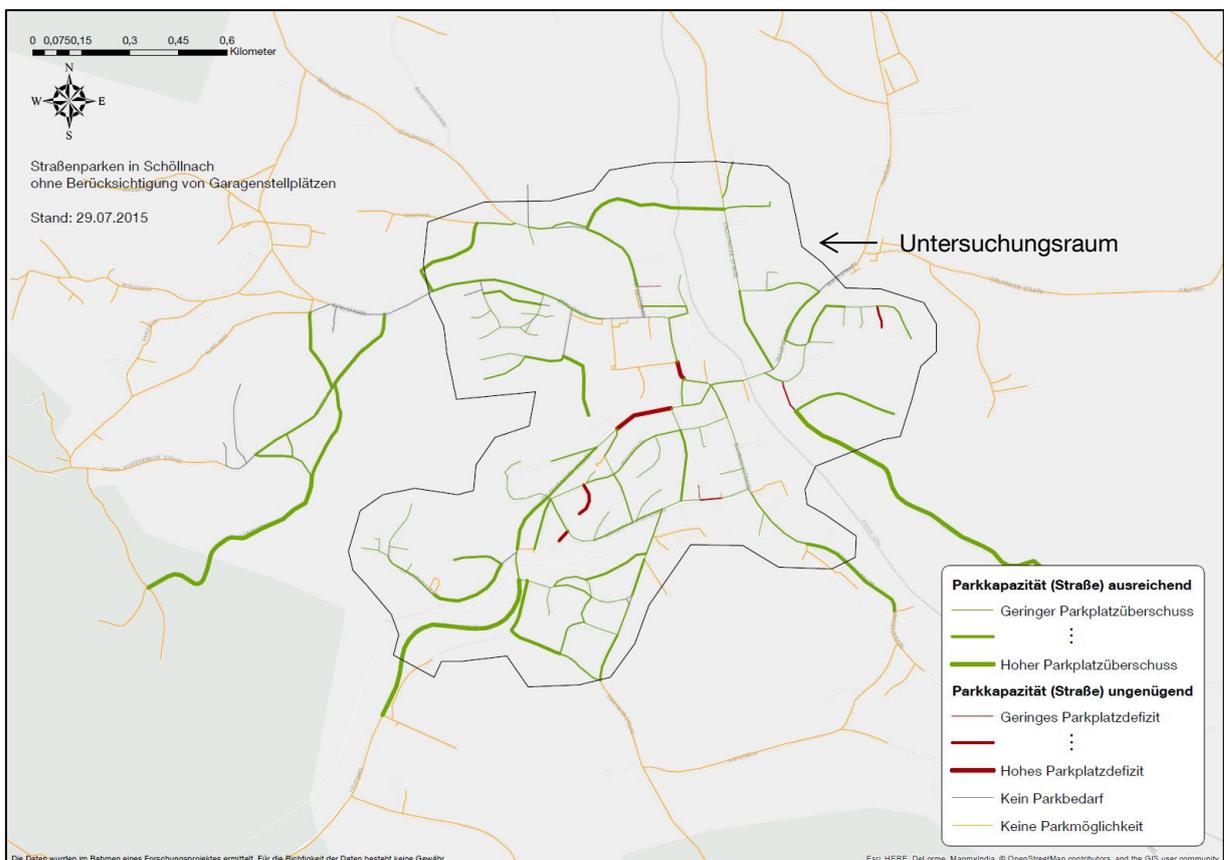


Abbildung 5.51: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Schöllnach ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: OpenStreetMap)

Dazu sind neben der räumlichen Verteilung der Pkw Informationen über das Straßennetz vonnöten, die für Schöllnach aus dem Datensatz in OpenStreetMap abgeleitet sind. Auch hier wird wieder davon ausgegangen, dass keine Berufspendler auf die Anzahl der unterzubringenden bzw. zu parkenden Fahrzeuge Einfluss nehmen (der Pendlersaldo ist in Schöllnach ohnehin negativ). Außerdem wird unterstellt, dass Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen und in großen Parkplätzen keine Rolle

spielen. Durch die charakteristische Gebäudestruktur, die verhältnismäßig geringe Bevölkerungsdichte sowie die daraus resultierende geringe Pkw-Dichte ergeben sich nur an wenigen Punkten innerhalb des Ortes Engpässe, was das Parken auf öffentlichen Straßen anbelangt. Dies würde theoretisch bedeuten, dass nahezu jedem Schöllnacher Pkw ein öffentlicher Parkstand bzw. eine Ladestation auf der Straße exklusiv zugeordnet werden könnte. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungszeiten der Pkw wäre natürlich eine Ladestation auch von mehreren Fahrzeugen zu nutzen.

Vor allen Dingen für Siedlungsstrukturen wie Schöllnach ist es sinnvoll, Pkw-Stellplätze in den zahlreich vorhandenen Einzel- und Doppelgaragen zu nutzen. Die Mehrheit der Fahrzeugeigentümer verfügt über diese private Abstellmöglichkeit. Werden alle verfügbaren Garagenstellplätze belegt, zeigt sich, dass die nur vereinzelt vorliegenden Parkplatzdefizite im Falle des alleinigen Straßenparkens vollständig behoben werden können. Der Parkplatzüberschuss in den verbleibenden Straßen wird deutlich erhöht. Diese Situation ist in **Abbildung 5.52** dargestellt.

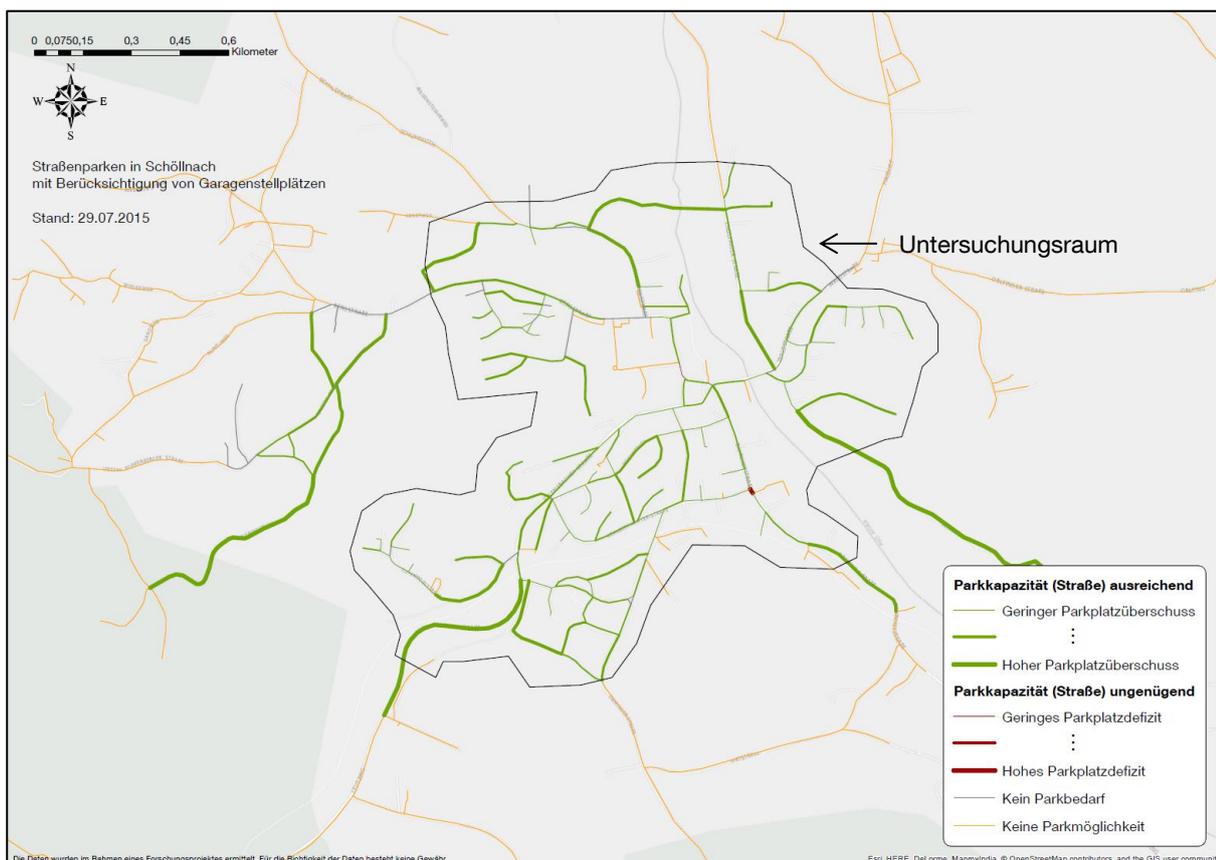


Abbildung 5.52: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Schöllnach unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: OpenStreetMap)

Diese Auswertungen sollen deutlich machen, welchen Einfluss private Abstellmöglichkeiten auf das Straßenparken abhängig von der Siedlungsstruktur haben und dass vorwiegend ländlich geprägte Orte mit ihren charakteristischen Merkmalen bezüglich Bevölkerungs-, Pkw- und Gebäudestruktur in diesem Fall Vorteile bieten können. Im Gegensatz zu Frankfurt am Main, wo halböffentliche und öffentliche Parkgaragen und Parkplätze in großer Zahl vertreten sind, spielt diese Unterbringungsmöglichkeit in Schöllnach keine Rolle.

Sämtliche Parkmöglichkeiten für Pkw in Schöllnach zeigt zusammenfassend **Abbildung 5.53**.

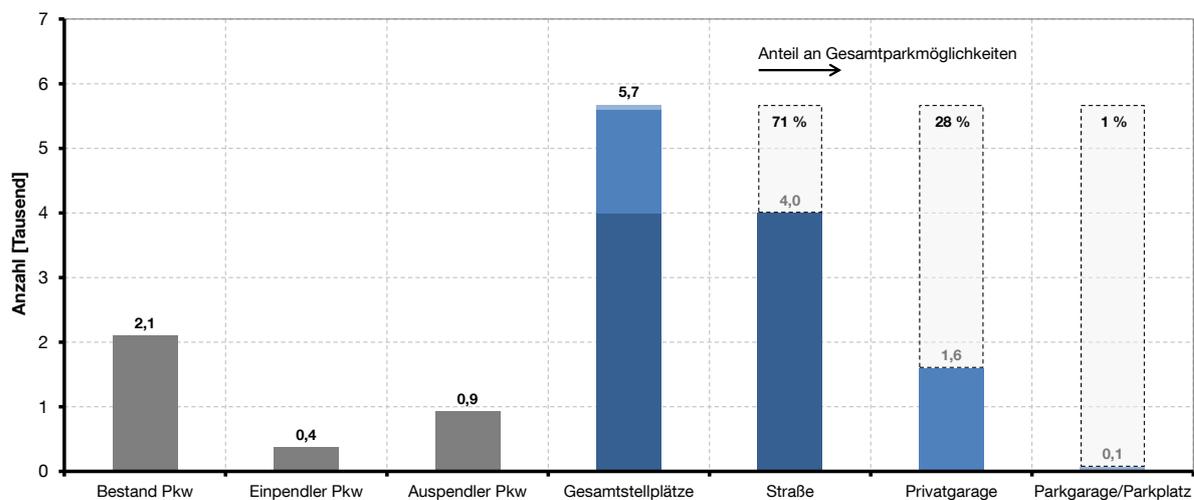


Abbildung 5.53: Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Schöllnach

Die Ermittlung des Pkw-Bestandes ergibt eine Zahl von 2.100. Während Frankfurt am Main und Ingolstadt einen positiven Pendlersaldo vorweisen können, übersteigt in Schöllnach die Zahl der Berufsauspendler deutlich die der Berufseinpender. Bei angenommenen 66 % Pkw-Nutzer innerhalb der Pendler-Gruppe stehen 380 Einpendler 930 Auspendlern gegenüber. Folglich sind in Schöllnach während des Tages weniger Pkw für die Unterbringung in Parkeinrichtungen zu berücksichtigen als während der Nachtstunden. Alle verfügbaren Parkstände auf öffentlichen Straßen und Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen sowie auf großen Parkplätzen ergeben zusammen 5.700 Parkmöglichkeiten im Kernort Schöllnach. 71 % davon sind auf der Straße vorzufinden, ein beträchtlicher Anteil von 28 % in Einzel- und Doppelgaragen. Dies ist gegenüber Frankfurt und Ingolstadt eine bedeutende Steigerung. Lediglich 1 % aller Parkmöglichkeiten liegt in der Kategorie Parkgarage/Parkplatz.

Grundsätzlich zeigen die Auswertungen für Frankfurt, Ingolstadt und Schöllnach eine deutliche Zunahme der privaten Unterbringungsmöglichkeiten von 9 % (Frankfurt)

auf 28 % (Schöllnach) bei einer gleichzeitigen klaren Abnahme der Abstellmöglichkeiten in halböffentlichen oder öffentlichen Parkgaragen und Parkplätzen.

5.3.2 Energieinfrastruktur und Strombereitstellung

Die Erläuterungen zur Energieinfrastruktur in den Fallbeispielen Singapur, Frankfurt am Main und Ingolstadt haben gezeigt, dass die Menge an integrierbarer regenerativer Energie durchaus abhängig ist von der Größe des Ortes, der Bevölkerungsdichte und der Siedlungsstruktur in der Untersuchungsregion. Natürlich spielen neben raum- und siedlungsstrukturellen Aspekten auch politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen eine Rolle. Dennoch kann eine gewisse Tendenz hinsichtlich einer einfacheren Realisierbarkeit regenerativer Energieerzeugung in weniger dicht besiedelten Regionen grundsätzlich festgestellt werden.

Schöllnach wird nun als viertes Fallbeispiel und ländlich geprägte Gemeinde in Bezug auf die Energieerzeugung, der potentiellen Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge und der Rolle der Elektromobilität analysiert.

Insgesamt betrachtet kommen auf dem gesamten Gemeindegebiet zur regenerativen Stromerzeugung derzeit hauptsächlich Photovoltaikanlagen zum Einsatz. Biogas- oder Biomasseanlagen sind nicht vorhanden. Zusätzlich werden fünf Erdwärmesonden betrieben. Zur regenerativen Stromerzeugung tragen weiterhin drei Kleinwasserkraftwerke an der Kleinen Ohe mit insgesamt 95 MWh/a bei. [135]

Gegenwärtig sind im gesamten Gemeindegebiet 6 MW Photovoltaikleistung installiert. Pro Jahr können damit etwa 5.400 MWh Strom erzeugt werden. [135, 136] Daraus lässt sich eine verbaute spezifische Leistung von 1.250 W pro Person ermitteln. Im Vergleich zu Frankfurt und Ingolstadt fällt dieser Wert um ein Vielfaches größer aus. Im Energie-Atlas Bayern wird von einem technischen Photovoltaikpotential für die Gemeinde Schöllnach von 35 % bezogen auf den Gesamtstromverbrauch der Gemeinde ausgegangen. Dies entspricht 14 MW installierter Leistung. Bei vollständiger Nutzung dieses Potentials würde sich die derzeit installierte pro Kopf-Leistung um weitere 1.700 W erhöhen. Durch Restriktionen und Einschränkungen fällt das umsetzbare Potential jedoch deutlich kleiner aus als das technische Photovoltaikpotential. Wird anstatt des Gesamtstromverbrauchs der Gemeinde der Stromverbrauch aller Privathaushalte als Berechnungsgrundlage verwendet, würde das technische Potential sogar 170 % betragen. Der Stromverbrauch der Gemeinde als Bezugsgröße wurde als Nettostromverbrauch statistisch ermittelt. Die aktuell verbauten 400 Anlagen in Schöllnach weisen einen Flächenverbrauch von gut 4 ha oder 40.000 m² auf. [135]

Für den Kernort der Marktgemeinde ist in **Abbildung 5.54** das Photovoltaikpotential in einfacher Weise abgeschätzt worden (50 x 50 m-Auflösung).

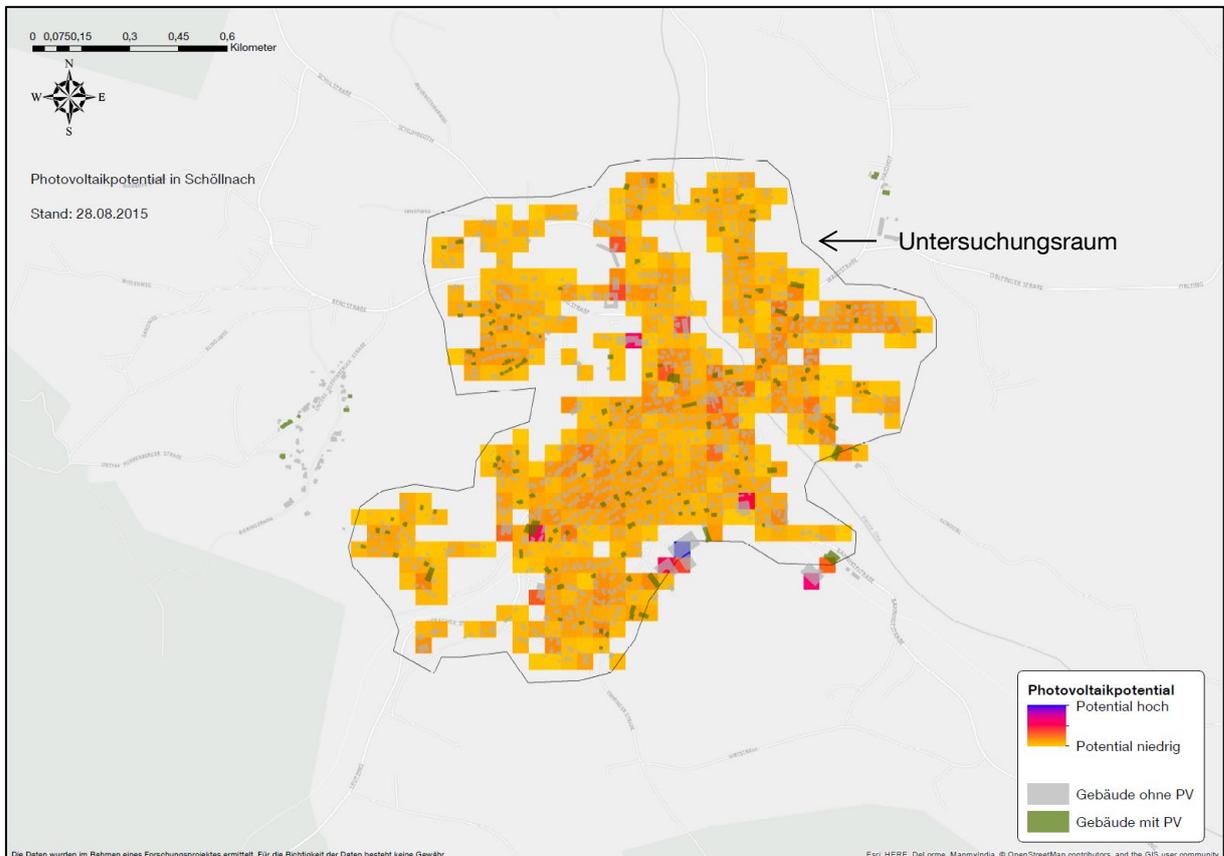


Abbildung 5.54: Einfache Abschätzung des PV-Potentials nach [100] für den Kernort der Gemeinde Schöllnach

Gebäude im Kernort der Gemeinde, die bereits über eine Photovoltaikanlage verfügen, sind grün eingefärbt. Dies sind rund 10 % aller Schöllnacher Gebäude innerhalb des Kernortes. Eine vergleichsweise hohe PV-Dichte ist in Gebieten dichter bebauter Wohnsiedlungen sowie Industriegebieten mit größeren Gebäuden und Dachflächen festzustellen. Nach einfacher Berücksichtigung von Aufbauten und Verschattungen lassen sich für den Kernort etwa 7.500 MWh Gesamtstromzeugung pro Jahr ermitteln, was ca. 8 MW installierter Leistung entspricht. Da etwa 1,3 MW bereits im Kernort installiert sind, ist noch ein Potential von 6,7 MW oder 1.900 W pro Einwohner verfügbar.

Die Abschätzungen basieren auf den Gegebenheiten des oben dargestellten Kernortes und berücksichtigen nicht die umliegenden Ortschaften, die jedoch aufgrund ihrer Struktur ebenfalls ein großes Potential für Photovoltaikanlagen bergen dürften.

Biomasse stellt für ländliche Regionen eine interessante Alternative zur Energieversorgung dar. Durch deren Nutzung können nicht nur Strom und Wärme produziert werden, sondern zusätzlich auch Biokraftstoffe. Gerade in ländlichen Regionen, wo üblicherweise Biomasse wächst und anfällt und somit keinen langen Transportwegen unterliegt, ist eine energetische Nutzung nur sinnvoll. Analog zur Ermittlung des Potentials in Ingolstadt kann auch für die Gemeinde Schöllnach verfahren werden. Das tierische Biomassepotential, das auf dem Viehbestand und der Gasausbeute tierischer Substrate basiert, beträgt jährlich betrachtet etwa 7,5 GWh oder 756.000 Nm³ Methan. Dies entspricht ca. 2.800 MWh_{el}/a. Bei Annahme eines durchschnittlichen Jahresstromverbrauchs eines Haushaltes von 3.500 kWh könnte damit etwa ein Drittel aller Schöllnacher Haushalte versorgt werden. Durch den Anbau von Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen können in Schöllnach 42 GWh/a (4,2 Mio. Nm³ Methan) als theoretisches landwirtschaftliches Potential ermittelt werden. Die daraus generierbaren 16 GWh/a elektrische Energie würden für die Versorgung von 4.500 Haushalten ausreichen und in Schöllnach zu einer enormen Stromüberproduktion führen. Die Waldfläche innerhalb des Gemeindegebietes beträgt 1.527 ha, von denen abgeschätzte 35 % (535 ha) forstwirtschaftlich bewirtschaftet werden. Mit einem angenommenen Zuwachs von 5 Efm. o. R. pro Jahr könnten in Schöllnach 6,1 GWh/a nachhaltig erzeugt werden. Insgesamt beträgt das Biomassepotential (landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich) etwa 56 GWh/a.

Die spezifischen Werte pro Kopf bezüglich der Integration von erneuerbaren Energien fallen für ländliche Regionen sehr positiv aus. Dies konnte bereits bei der Analyse des Photovoltaikpotentials festgestellt werden. Werden die spezifischen Ergebnisse der Potentialermittlung für Biomasse herangezogen, zeigt sich diese Situation erneut. In Ingolstadt liegt das maximale theoretische Potential bei ca. 1.500 kWh pro Einwohner, in Schöllnach liegt es um den Faktor 8 höher bei 11.500 kWh.

Zusammenfassend zeigt sich für die Gemeinde Schöllnach bzw. für den Kernort, dass die Potentiale für erneuerbare Energien und vorwiegend für Photovoltaik und Biomasse als sehr hoch einzustufen sind. Ein stärkerer Ausbau der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung kann sich für Schöllnach positiv auswirken, auch vor dem Hintergrund der Integration neuartiger Verbraucher wie Elektrofahrzeuge. Dass die Integration erneuerbarer Energien und die Erzeugung CO₂-freien Stroms in ländlichen Regionen deutlich einfacher zu bewerkstelligen sind als in dicht besiedelten Strukturen, zeigen auch die Ergebnisse aus [137], wo eine räumliche Modellierung und Optimierung regionaler Energiesysteme durchgeführt wird.

Natürlich bieten sich auch für die Gemeinde Schöllnach Konzepte zum kombinierten Einsatz von dezentralen erneuerbaren Energieanlagen (z. B. Wärmepumpen und PV-Anlagen) und Elektrofahrzeugen, wie sie für Frankfurt am Main und Ingolstadt diskutiert wurden.

5.4 Kostenabschätzung von Ladeinfrastruktursystemen

Die Untersuchungen der Parkraum- und Parkflächenstruktur und der Möglichkeiten, Fahrzeuge in den untersuchten Regionen zu parken, lassen grundlegende Aussagen zum Aufbau sinnvoller Ladeinfrastrukturen zu. Gleichzeitig können an dieser Stelle erste Überlegungen für Ladeinfrastrukturkosten angestellt werden.

Generell hängen der Ausbau der Ladeinfrastruktur und somit die zu tätigen Investitionen von vielerlei Faktoren ab. Zunächst ist es zweckmäßig, aufgrund der einfacheren Realisierung private Ladeeinrichtungen in der heimischen Garage zu nutzen. Dennoch ist es abhängig von der betrachteten Region notwendig, halböffentliche oder öffentliche Ladestationen für Straßenparker und Fahrzeugnutzer ohne eigene Garage anzubieten. Der Aufbau und die Bestimmung der Anzahl sowie des Standortes von öffentlichen Stationen können sich dabei z. B. an geografischen Gegebenheiten einer Region oder aber auch an den Nutzerbedürfnissen und am Nutzerverhalten orientieren. Die Wahl der passenden Methode hängt zudem auch von der Größe des betrachteten Gebietes ab. Untersuchungen dazu sind beispielsweise in [138] durchgeführt worden.

Zur ersten Abschätzung von Kosten für Ladeinfrastruktursysteme in den vier untersuchten Fallbeispielen Singapur, Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach wird davon ausgegangen, dass zunächst die zur Verfügung stehenden privaten Unterbringungsmöglichkeiten zum Laden von Elektrofahrzeugen prioritär genutzt werden. Im Kernort Schöllnach stehen ca. 1.600 Stellplätze in vorwiegend Einzel- aber auch zum Teil in Doppelgaragen zur Verfügung. Unter der Annahme, dass diese Anzahl von Stellplätzen bzw. Garagen derselben Anzahl von Haushalten zugeordnet wird und der Berücksichtigung einer durchschnittlichen Haushaltsgröße von 2,3 Bewohnern sowie eines Motorisierungsgrades von 0,6 Pkw pro Einwohner, kann von einer Belegung aller Stellplätze ausgegangen werden. Für die Stadt Ingolstadt konnten etwa 17.000 Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen ermittelt werden. In einem durchschnittlichen Ingolstädter Haushalt leben 2,15 Personen. Wird davon ausgegangen, dass die ermittelten Stellplätze ebenfalls 17.000 Haushalten bzw. Wohnhäusern zugeordnet werden können, ergibt sich eine Bevölkerungszahl von 36.500, die auf einen Garagenstellplatz zurückgreifen kann. Mithilfe des Motorisierungsgra-

des von 0,7 Pkw pro Einwohner lassen sich 25.000 Pkw berechnen, die die Anzahl der privaten Stellplätze übersteigen und diese somit vollständig belegen dürften. Für Frankfurt am Main führen ähnliche Überlegungen zu einer Stellplatzanzahl in privaten Garagen von gut 50.000 (1,83 Bewohner pro Haushalt; 0,45 Pkw pro Einwohner). Auch in Singapur existieren ca. 70.000 Stellplätze meist in Einzelgaragen. Aufgrund der strikten Regularien bei der Zulassung eines Pkw und der Beschränkung des Pkw-Bestandes in Singapur wird jedoch unterstellt, dass diese Unterbringungsmöglichkeiten nicht vollständig ausgeschöpft werden. Es ist davon auszugehen, dass eine Privatgarage vorwiegend einem Einfamilien- oder Mehrfamilienhaus zugeordnet ist. Ein Haushalt verfügt im Schnitt über 4,3 Bewohner. Damit können etwa 300.000 Personen auf einen privaten Garagenstellplatz zugreifen. Unter Zugrundelegung des Singapurischer Motorisierungsgrades von 0,12 ist es also lediglich 36.000 Pkw möglich, in einer Privatgarage untergebracht zu werden. Da jedoch der Pkw-Besitz von Einfamilienhausbesitzern im Schnitt als wahrscheinlicher angenommen werden kann im Vergleich zum Durchschnitts-Singapurer (höherer Motorisierungsgrad), wird im Folgenden eine Belegung von 45.000 angenommen. Dies entspricht zwei Drittel der verfügbaren privaten Stellplätze.

Zur Bestimmung der Investitionskosten und des Anteils der durch private Lademöglichkeiten erzielbaren Durchdringung mit Elektrofahrzeugen in den jeweiligen Regionen sind Kenntnisse über die Ausgaben für die einzelnen Infrastrukturkomponenten notwendig. Zahlreiche Studien machen Angaben über die Kosten von Einzelkomponenten, die zum Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur benötigt werden. In [38] wird eine umfassende Analyse verschiedener Studien durchgeführt und ein Überblick über Ladeinfrastrukturkosten gegeben, die sich im Bereich zwischen 0 bis 1.100 Euro bewegen (Gesamtkosten für Hardware und Montage, ohne Betriebskosten). Zudem werden Kosten für Einzelkomponenten ausgewiesen. Auch [139] sammelt Informationen über anfallende Kosten für den Aufbau von Ladeinfrastrukturen.

Die in den angesprochenen Studien nach der Kostenanalyse verwendeten Daten für Hardware, Installation und Wartung sowie die in dieser Arbeit zugrunde gelegten Kosten sind in **Tabelle 5.5** zusammengefasst.

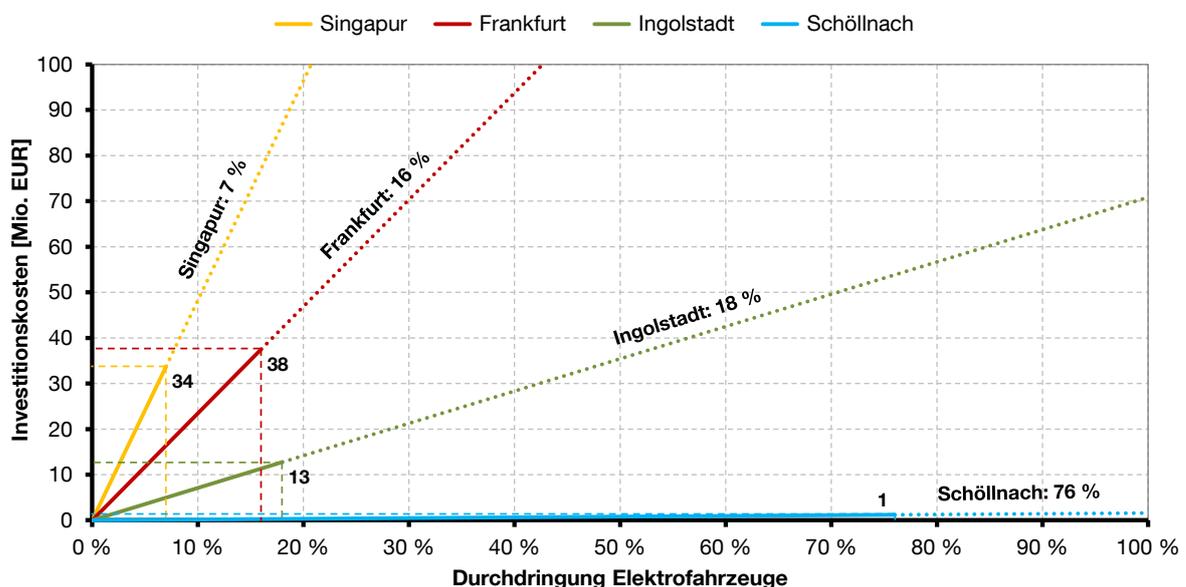
Ausgegangen wird von einem konduktiven Ladesystem mit einer Leistung von 3,6 kW. Dieses stellt die günstigste Art dar, sein Elektrofahrzeug privat zuhause zu laden. Private induktive Ladesysteme erfordern bei Weitem höhere Investitionen [38, 139].

Tabelle 5.5: Kosten für Komponenten einer privaten Ladeinfrastruktur (konduktiv; 3,6 kW)

Studie	Hardware [EUR]	Installation [EUR]	Wartung [%Hardware p. a.]
Kley, F. et al., 2011 [38]	100-150	50-200	5,0-10,0
Thoma, Y., 2014 [139]	400	300	5,1
Wagner, M., 2016 (diese Studie)	500	250	7,5

Zur Analyse der Investitionskosten für private Lademöglichkeiten in der heimischen Garage werden in dieser Arbeit für nachfolgende Berechnungen die Hardwarekosten zu 500 Euro angenommen. Darin enthalten sind Ausgaben für Infrastruktur, Kommunikation, Abrechnung, Leistungselektronik sowie das Ladekabel [38]. Installationskosten für Montage oder Bereitstellung eines Stromanschlusses fallen vor allem im privaten Bereich relativ gering aus, da häufig bereits ein Stromanschluss z. B. in der Garage oder im Carport vorhanden ist. Die Basis bilden hier 250 Euro. Wartungskosten machen in dieser Arbeit 7,5 % der Hardwarekosten aus.

Die Ergebnisse der Ermittlung der Investitionskosten, die im Falle des prioritären Aufbaus einer privaten Ladeinfrastruktur in den jeweiligen Untersuchungsregionen anfallen, werden in **Abbildung 5.55** visualisiert.

**Abbildung 5.55: Potentielle Durchdringung von Elektrofahrzeugen sowie Investitionskosten bei der Nutzung vorhandener privater Garagenstellplätze in den Untersuchungsregionen**

Gleichzeitig kann daraus die durch den Aufbau und die Nutzung von privaten Lademöglichkeiten potentielle maximale Durchdringung mit Elektrofahrzeugen bestimmt werden.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die ländlich geprägte Gemeinde Schöllnach (Kernort) bei Betrachtung einer privaten Ladeinfrastruktur deutlich im Vorteil liegt. Insgesamt könnten unter Ausnutzung aller an die Wohngebäude angrenzenden Garagenstellplätze etwa 76 % der im Kernort verfügbaren Fahrzeuge als Elektrofahrzeuge integriert werden, da davon ausgegangen wird, dass diese in den Unterbringungsmöglichkeiten in einfacher Weise geladen werden können. Zudem werden die Fahrzeuge dort meistens über Nacht abgestellt. Vermutlich liegt die Durchdringungsrate in Schöllnach noch höher. Eine genauere Abschätzung der vorhandenen Garagen sowie der tatsächlich im Kernort verfügbaren Pkw konnte mit den zur Verfügung stehenden Daten jedoch nicht durchgeführt werden. Die ermittelte Durchdringungsrate würde für Schöllnach eine Investitionssumme von etwa 1 Mio. Euro bedeuten. Bei optimistischeren, minimalen Kostenannahmen für Hardware und Installation (Kley et al. in Tabelle 5.5) reduzieren sich die Kosten auf nur noch ca. 250.000 Euro. Auf den Kernort übertragen würde dies Installationskosten pro Kopf zwischen 70 und 330 Euro bedeuten (Berücksichtigung des Bevölkerungsanteils, der auf einen privaten Stellplatz zurückgreifen kann). Die jährlichen Wartungskosten für sämtliche private Ladestationen in Schöllnach (7,5 % der Hardwarekosten) belaufen sich bezogen auf die Kostensituation in Abbildung 5.55 auf 60.000 Euro. Zusätzlich kann eine Abrechnung des Ladevorganges einfach über den Hausanschluss erfolgen.

Da private Ladestationen einem Fahrzeug exklusiv zugeordnet sind, fällt die tägliche Auslastung entsprechend niedrig aus. Die fragebogenbasierte Umfrage hat ergeben, dass die befragten Bürger im Durchschnitt 47,3 km pro Tag zurücklegen. Bei einem Verbrauch von 16 kWh/100 km ergibt sich ein Tagesenergiebedarf von 7,6 kWh. Damit beträgt die tägliche Auslastung der privaten Ladestation bei regulären Ladevorgängen etwa 8,8 %. Kann das Fahrzeug auch am Arbeitsplatz geladen werden, verringert sich die Auslastung weiter. In Schöllnach können für Straßenparker ohne eigene Garage zusätzlich öffentliche Ladestationen sinnvoll sein. Ein Großteil von Elektrofahrzeugen könnte jedoch bereits ohne eine öffentliche Infrastruktur integriert werden. Theoretisch würde für den Standort Schöllnach für Nutzer ohne eigene Garage selbst das Laden am Arbeitsplatz ausreichen. Schöllnach kann ohnehin als Auspendlerort betrachtet werden, der über die vorherrschenden Pendlerströme mit mittelgroßen und großen Städten wie z. B. Ingolstadt oder Frankfurt verflochten ist. Dort, am Arbeitsplatz angekommen, besteht für Pendler tagsüber die Möglichkeit,

z. B. von den hohen PV-Potentialen zu profitieren (Dualität zwischen ländlichem Raum und dichter besiedelten Städten durch Pendlerverflechtungen).

Ingolstadt, das lediglich in den Außenbezirken und in den ländlichen Ortsteilen eine lockere Bebauung zeigt, weist relativ gesehen einen geringeren Zugang zu Garagenstellplätzen und somit zu einer möglichen privaten Ladeinfrastruktur auf. Insgesamt ist es theoretisch möglich, unter Ausnutzung sämtlicher Garagenstellplätze in privatem Eigentum etwa 18 % aller Pkw in Ingolstadt als Elektrofahrzeuge zu betreiben. Dazu ist mit Investitionskosten für Hardware und Installation bei einem mittleren Kostenszenario von insgesamt 13 Mio. Euro oder 350 Euro pro Kopf zu rechnen (Bevölkerungsanteil mit Zugang zu einem Privatstellplatz). Für die jährliche Wartung müssten in diesem Fall für alle Ladestationen des gesamten Stadtgebietes etwa 640.000 Euro veranschlagt werden. Aufgrund der geringeren Tagesfahrleistung in Ingolstadt im Vergleich zu Schöllnach liegt die Auslastung einer privaten Ladestation bei gerade einmal 7,2 % pro Tag.

Mit zunehmender Dichte des Untersuchungsgebietes nimmt der prozentuale Anteil an Garagenstellplätzen bezogen auf die Gesamtstellplätze und somit auch der mögliche Anteil der Durchdringung mit Elektrofahrzeugen durch die Nutzung privater Ladeeinrichtungen ab. Dies wird bei Betrachtung der Untersuchungsregion Frankfurt am Main deutlich, wo nur mehr 16 % aller Pkw in Privatgaragen geladen und somit durch Elektrofahrzeuge substituiert werden könnten. Für die Umrüstung der gut 50.000 ermittelten Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen fallen bereits Investitionskosten von 38 Mio. Euro an. Dies würde pro Kopf einen Betrag von etwa 410 Euro bedeuten (Bevölkerungsanteil mit Zugang zu einem Privatstellplatz). Eine Summe von 1,9 Mio. Euro ist bereits für die Wartungskosten aller Ladestationen pro Jahr zu veranschlagen. Auch in Frankfurt beträgt die tägliche Auslastung einer Ladestation etwa 7 %.

Kapitel 5.1.1 hat gezeigt, dass Pkw in Singapur vorwiegend in großen Parkgaragen untergebracht werden. Dennoch sind private Einzelstellplätze häufig Bestandteil von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern, die neben den Wohnkonzepten der Condominiums sowie der HDB-Anlagen in einzelnen Wohnsiedlungen in Singapur vorzufinden sind. Insgesamt können 45.000 Garagenstellplätze genutzt werden, um Elektrofahrzeuge dort privat mit Strom zu versorgen. Eine potentielle maximale Durchdringung mit Elektrofahrzeugen ist in Singapur in diesem Fall zu 7 % möglich. Um diesen Anteil zu erreichen, sind Hardware- und Installationskosten von etwa 34 Mio. Euro anzusetzen (112 Euro pro Einwohner mit Zugang zu einem Privatstellplatz). Wartungskosten schlagen in diesem Szenario mit 1,7 Mio. Euro pro Jahr zu Buche.

Die Auslastung einer privaten Ladestation beträgt in Singapur aufgrund der Jahresfahrleistung eines Pkw von 17.500 km ca. 9 %.

Während für Schöllnach der Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur sinnvoll erscheint und die beiden städtischen Strukturen Ingolstadt und Frankfurt am Main neben einem vergleichsweise hohen Anteil an Privatstellplätzen auch weitere Abstell- und Lademöglichkeiten für Fahrzeuge bieten, zeigt sich für Singapur die Nutzung großer Parkgaragen zum Abstellen und Laden potentieller Elektrofahrzeuge als sinnvolle Option. Die Unterschiede der beiden Extremgebiete Schöllnach und Singapur stellen sich demnach relativ klar dar.

Für Singapur soll nun noch abgeschätzt werden, im welchem Rahmen sich die Investitionen für die Elektrifizierung von Parkhäusern und Nutzung von Ladestationen in etwa bewegen. In dieser Arbeit konnte bestimmt werden, dass 50 % aller Parkgaragen Singapurs innerhalb von Wohnanlagen platziert sind (1.084 Parkgaragen), 35 % sind Arbeits- und Ausbildungsstätten zugeordnet (803 Parkgaragen), während auf Freizeiteinrichtungen 15 % entfallen (338 Parkgaragen). In [140] werden ähnliche Annahmen getroffen. Hier wird von einem Anteil von 55 % zuhause, 35 % am Arbeitsplatz sowie von 10 % in Freizeiteinrichtungen ausgegangen. Zusätzlich wird darin die Annahme getroffen, dass 10 % aller Pkw in Singapur elektrisch betrieben werden und jedes Fahrzeug im Durchschnitt einmal pro Tag entsprechend der Verteilung der Parkgaragen geladen wird (z. B. finden 55 % aller Ladevorgänge in den Parkgaragen zuhause statt). Unter Zuhilfenahme des in [141] entwickelten Mobilitätsmodells für Singapur zur Beschreibung des Fahr- und Parkverhaltens basierend auf einem endlichen Zustandsautomaten konnte in [140] die Anzahl der gleichzeitigen Ladevorgänge sowie der notwendigen Ladestationen pro Parkhaus bestimmt werden. Demnach ergeben sich für ein Parkhaus zuhause in der Wohnanlage bei einer 10-prozentigen Durchdringung mit Elektrofahrzeugen 28 Ladestationen, in Parkgaragen am Arbeitsplatz 25 sowie 12 Ladestationen in Freizeiteinrichtungen.

Zur Abschätzung der Investitionskosten, die für den Aufbau und die Nutzung dieser Ladeeinrichtungen in den unterschiedlichen Typen von Parkgaragen anfallen, werden die Kostenannahmen aus **Tabelle 5.6** verwendet.

Für Parkgaragen zuhause werden dieselben Annahmen getroffen wie auch schon im Falle des Aufbaus einer privaten Ladeinfrastruktur in Einzel- und Doppelgaragen (siehe Tabelle 5.5). Fahrzeuge stehen dort während der Nacht und können durch reguläre 3,6 kW-Ladevorgänge mit Strom gespeist werden.

Tabelle 5.6: Kosten für Komponenten der Ladeinfrastruktur für Parkgaragen in Singapur (konduktiv; 3,6 kW, 7,2 kW und 11,0-22,2 kW)

<i>Standort</i>	<i>Hardware [EUR]</i>	<i>Installation [EUR]</i>	<i>Peripherie [EUR]</i>
Zuhause (3,6 kW)	500 ³	250 ³	750
Arbeits-, Ausbildungsplatz (7,2 kW)	1.300 ⁴	850 ⁴	750
Freizeiteinrichtung (11,0-22,2 kW)	2.200 ⁵	850 ⁴	750

Für Ladestationen in Parkhäusern am Arbeitsplatz wird eine Ladeleistung von 7,2 kW angesetzt, da die Standzeiten kürzer als zuhause ausfallen dürften und gemäß dem erwähnten Mobilitätsmodell Fahrzeugnutzer zum Teil nur halbtags beschäftigt sind und sich die Standzeit des Fahrzeuges in der Parkgarage dadurch verkürzt. Für Freizeiteinrichtungen, wo Fahrzeuge im Allgemeinen eine vergleichsweise kurze Standzeit aufweisen, werden Schnellladestationen mit einer Ladeleistung von 11,0-22,2 kW angenommen. Zusätzlich wird für die Realisierung der Authentifizierung des Fahrzeugnutzers an der Ladestation, der Durchführung der Abrechnung der Stromkosten des Ladevorgangs sowie für weitere notwendige Komponenten der Ladestationen ein Betrag von 750 Euro festgesetzt (Peripherie).

Abbildung 5.56 visualisiert die Investitionskosten, die im Falle einer Ausstattung von Parkgaragen mit Ladestationen in Singapur anfallen würden.

Insgesamt können für die Ladeinfrastruktur in Parkgaragen von Freizeiteinrichtungen 15,4 Mio. Euro für Hardware, Installation und zusätzliches Equipment abgeschätzt werden. Die Kosten für die einzelnen Komponenten derartiger Schnellladestationen sind vergleichsweise hoch, was jedoch durch die geringe Anzahl an Parkgaragen dieser Kategorie wieder relativiert wird. Für den Ausbau am Arbeitsplatz ist mit knapp sieben Mal so hohen Investitionen zu rechnen, da zum einen mehr als 800 Parkhäuser dieser Kategorie existieren und zum anderen eine einzelne Ladestation mit vollständiger Ausstattung mit gut 3.000 Euro zu Buche schlägt. Aufgrund der geringen Kosten für den Aufbau von privaten Ladestationen mit einer Ladeleistung von 3,6 kW in Parkgaragen, die innerhalb von Wohnanlagen angesiedelt sind, sind hierfür nur 45,5 Mio. Euro aufzubringen. Insgesamt ist mit etwa 160 Mio. Euro zu rechnen, um ca. 55.000 Fahrzeuge als Elektrofahrzeuge betreiben zu können. Im Falle der vollständigen Nutzung des Potentials in privaten Einzel- und Doppelgara-

³ siehe Tabelle 5.5

⁴ Thoma, Y., 2014 [139]

⁵ Kley, F. et al., 2011 [38]

gen, wodurch etwa 45.000 Fahrzeuge integriert werden könnten, liegt die Investitionssumme bei 34 Mio. Euro.

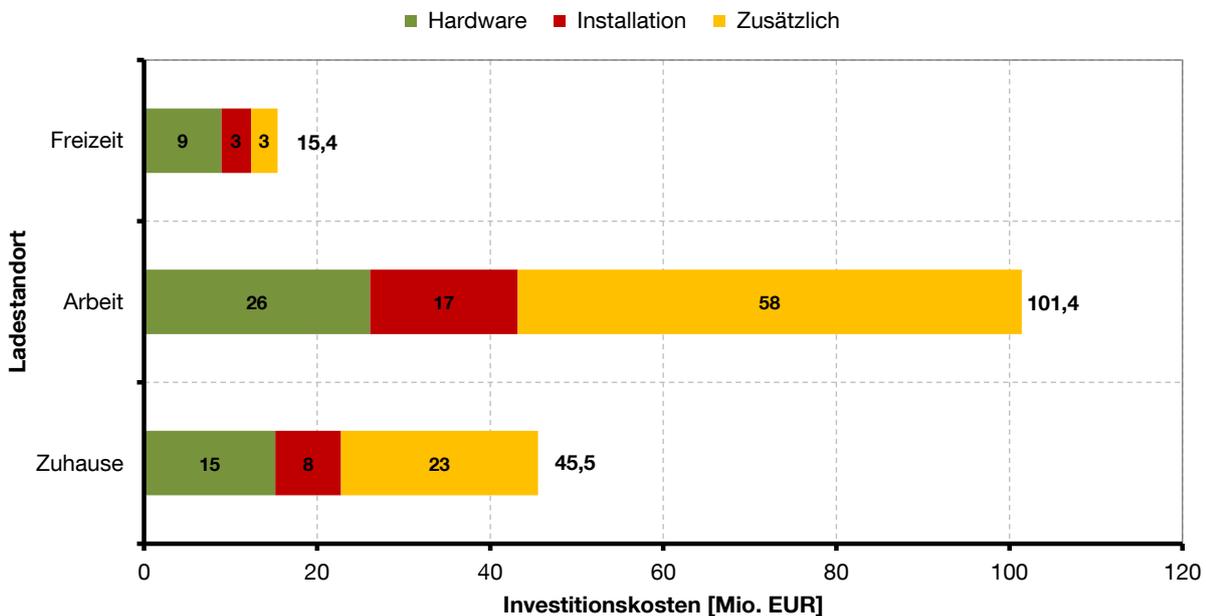


Abbildung 5.56: Investitionskosten für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur in verschiedenen Typen von Parkgaragen in Singapur unter Annahme einer 10-prozentigen Durchdringung mit Elektrofahrzeugen

Für Ingolstadt und Frankfurt kann der Aufbau einer halböffentlichen Ladeinfrastruktur innerhalb von Parkhäusern ebenfalls sinnvoll sein. Vor allen Dingen für Berufseinpendler, die in diesen beiden Städten stark vertreten sind, stellt die Parkgarage eine wichtige Alternative dar. Genauso ist für Pendler das Parken auf der Straße von großer Bedeutung. An der Nutzung einer öffentlichen oder halböffentlichen Ladeinfrastruktur führt für diese Gruppe kein Weg vorbei, insbesondere dann, wenn sie zuhause auf keine private Ladeinfrastruktur zurückgreifen können.

Um genauere Infrastrukturplanungen und Ermittlungen von Kosten durchführen zu können, sind – hauptsächlich für die Mischstrukturen Frankfurt am Main und Ingolstadt – weitere Analysen notwendig. Diese können beispielsweise auf dem Nutzerverhalten und dem Fahrverhalten basieren. Dieses Kapitel soll einen ersten Überblick über potentielle Kosten geben, wobei verstärkt auf die beiden Extremszenarien Singapur und Schöllnach eingegangen wurde. Die Untersuchung zeigt, dass zwischen dichtem Gebiet und weitem Gebiet unterschieden werden muss. Ein ausgedehntes Gebiet wie es Schöllnach darstellt ist ideal dazu geeignet, Elektrofahrzeuge privat zu laden. Dicht bebaute Gebiete wie Singapur eignen sich aufgrund ihrer

Parkraumstruktur ebenfalls hervorragend dafür, Elektrofahrzeuge zu integrieren (Singapur stellt allerdings einen Sonderfall dar). Wesentlich schwieriger sind Mischstrukturen zu bewerten.

5.5 Ergebniszusammenfassung

Nach Analyse des Parkraumes und der Energieinfrastruktur, der Bewertung der potentiellen Rolle der Elektromobilität in der Zukunft sowie nach ersten Aussagen zu Ladeinfrastrukturkosten in allen vier Untersuchungsregionen sollen die Ergebnisse an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden.

In der Diskussion der vorausgegangenen Fallbeispiele kann beobachtet werden, dass die Integration von Elektrofahrzeugen aus unterschiedlichen Gründen Sinn ergibt. In Singapur, wo ohnehin durch das hervorragend ausgebaute Schnellbahnnetz bereits eine Form von Elektromobilität im Verkehrssektor vorhanden ist, kann die Nutzung von Elektrofahrzeugen in Kombination mit erneuerbaren Energien zu weiteren Emissionsreduktionen führen. Darüber hinaus kann dadurch zusätzlich die Importabhängigkeit von benachbarten Staaten wie Malaysia oder Indonesien reduziert werden. Pkw werden hauptsächlich in Parkgaragen abgestellt, was eine Elektrifizierung des Individualverkehrs deutlich vereinfacht. Dies bringt jedoch hohe Investitionen mit sich.

In Frankfurt und Ingolstadt, die neben einem dichten Stadtkern auch ländliche Strukturen zeigen, ist die Problematik und Komplexität in der Nutzung von Elektrofahrzeugen und dem Aufbau von Ladeinfrastrukturen standortabhängig. Private Ladestationen können in einfacher Weise installiert werden, weitere Möglichkeiten in Form von halböffentlichen oder öffentlichen Ladestationen scheinen hier jedoch notwendig. Aber auch in diesen Regionen sind bereits teilweise auf Elektromobilität basierende Verkehrsmittel bzw. Verkehrsträger installiert (z. B. U-Bahn). Bezüglich der Ladestrombereitstellung stellt für beide Regionen die Stromerzeugung durch Photovoltaik eine interessante Alternative dar. Gerade in diesen Mischstrukturen mit starken Pendlerverflechtungen kann die Elektromobilität einfacher in dezentrale Energiesysteme (Gebäude) eingebunden werden als in Megastädten.

Ein Wechsel auf alternative Verkehrsmittel (z. B. auf U-Bahn- oder Bussysteme) ist im Fallbeispiel Schöllnach nicht möglich. Die Nutzung des Pkw ist aufgrund der relativen Ablegenheit derartiger ländlich geprägter Strukturen und der fehlenden Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr für die Alltagsmobilität essentiell. Die Tatsache, dass in der Regel keine Alternative zum Pkw existiert, macht eine Integration von Elektrofahrzeugen in Schöllnach und kleineren ländlichen Gemeinden durchaus

attraktiv. Das Mobilitätsverhalten bezüglich durchschnittlicher Fahrweiten ist ähnlich dem Verhalten in der Stadt und hemmt die Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Erfüllung der Alltagsmobilität in keiner Weise. Ein Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur, der zu einer Durchdringung mit Elektrofahrzeugen von 76 % führen würde, lässt sich in Schöllnach verhältnismäßig einfach und kostengünstig realisieren. Zudem bieten ländliche Regionen bei der Bereitstellung regenerativen Stroms viele Vorteile. Die Menge an integrierbarem Strom ist im Vergleich zu Städten deutlich höher einzustufen.

6 Vergleichende Analyse der Fallbeispiele und Fazit

Dieses Kapitel soll die Ergebnisse aller Fallbeispiele aus den vorangegangenen Kapiteln nochmal zusammenfassen und abschließende Beurteilungen durch eine vergleichende Analyse hervorbringen.

Nach Prüfung unterschiedlicher Kriterien wie des Parkraumes und der Energieinfrastruktur, der Bewertung der potentiellen zukünftigen Rolle der Elektromobilität sowie nach ersten Aussagen zu Ladeinfrastrukturkosten in den Untersuchungsregionen erfolgt in **Tabelle 6.1** eine abschließende Bewertung für die untersuchten Raumstrukturen.

Tabelle 6.1: Bewertung der untersuchten Fallbeispiele in Hinblick auf die Integration und Nutzung von Elektro-Pkw

Kriterium	Singapur	Frankfurt	Ingolstadt	Schöllnach
Verkehrsangebot/Modal Split	<i>sehr niedrig</i>	<i>niedrig</i>	<i>hoch</i>	<i>sehr hoch</i>
Bedeutung des motorisierten Individualverkehrs (Pkw)	--	-	+	++
Parkraum/Ladeinfrastruktur		<i>mittel</i>		
Einfache Realisierbarkeit von Ladeinfrastrukturen (Ladestation)	+	o	o	++
Energiestruktur				
Einfache Integrierbarkeit von erneuerbaren Energien	-	+	+	++
Infrastrukturkosten				
Einfache finanzielle Realisierbarkeit von Ladeinfrastrukturen	-	o	o	++
Emissionsreduktion				
Notwendigkeit von Emissionsreduktionen (CO ₂ , Lärm)	++	+	+	o

Die Untersuchungen zu Singapur haben gezeigt, dass neben der Nutzung des motorisierten Individualverkehrs weitere Alternativen zur Bewältigung der Alltagsmobilität gegeben sind. Singapur bietet ein sehr gut ausgebautes Schnellbahn- und Busnetz an, was den Verzicht auf die Nutzung des eigenen (Elektro-)Pkw deutlich einfacher macht. Der Modal Split wird bereits zu 44 % vom öffentlichen Personenverkehr gebildet. Dies liegt vor allem auch an den angesprochenen Beschränkungen im Pkw-Verkehr (Bewertung hinsichtlich Modal Split: sehr niedrig). In Frankfurt existieren ne-

ben dem motorisierten Individualverkehr ebenso alternative Verkehrsangebote. Dadurch könnte auch in dieser Region im Alltag auf den eigenen Pkw verzichtet werden. Eine elektromobile Komponente im Verkehrssektor ist mit der U- und S-Bahn bereits vorhanden (Bewertung: niedrig). In Strukturen wie der Stadt Ingolstadt ist bereits eine deutliche Verschiebung des Modal Splits zugunsten der Individualmobilität festzustellen. Die mit dem Pkw (oder auch Zweirad) zurückgelegten Wege nehmen 53 % im Modal Split ein. Neben der Nutzung des Pkw kann in Ingolstadt zwar auf den Busverkehr zurückgegriffen werden, dennoch sind die auf dem Stadtgebiet gelegenen Ortschaften außerhalb des Zentrums auf die individuelle Mobilität angewiesen (Bewertung: hoch). Am deutlichsten zeigt sich die bedeutende Rolle des Pkw im ländlichen Raum am Beispiel der Gemeinde Schöllnach. Mehr als 80 % der täglichen Wege werden in dieser Untersuchungsregion mit dem Pkw zurückgelegt. Dies ist aufgrund des fehlenden ÖPNV-Angebotes auch gar nicht anders zu erwarten. Bis auf einzelne Busverbindungen stellt die Nutzung des privaten Pkw die einfachste und bequemste Möglichkeit dar, die Alltagsmobilität zu bewältigen. Damit kann Schöllnach mit Blick auf das Kriterium Verkehrsangebot/Modal Split ein sehr hohes Potential für die Integration von Elektrofahrzeugen bescheinigt werden. Die Substitution von herkömmlichen Pkw durch Elektroautos erscheint aufgrund der ohnehin starken Dominanz des Pkw äußerst attraktiv.

In ländlichen Regionen kommt hinzu, dass sich der Parkraum für die Nutzung von Elektrofahrzeugen (zum Laden) sehr vorteilhaft gestaltet. Durch eine sehr geringe Bevölkerungsdichte in Schöllnach und eine Wohnbebauung, die vorwiegend von Einfamilienhäusern mit häufig privaten Garagen- oder Carportstellplätzen charakterisiert ist, lässt sich der Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur verhältnismäßig einfach realisieren, was eine Durchdringung mit Elektro-Pkw von etwa 76 % ermöglichen würde (Bewertung hinsichtlich Ladeinfrastruktur: sehr hoch). In den Städten Frankfurt und Ingolstadt, die neben dem eigentlichen Stadtzentrum auch ländlich geprägte Stadtteile bzw. Ortschaften aufweisen, wird die Eignung des Parkraums für den Aufbau der Ladeinfrastruktur als mittelmäßig klassifiziert. Einerseits ist ein gewisses Potential zur Schaffung einer privaten Ladeinfrastruktur vorhanden (Frankfurt: 16 %, Ingolstadt: 18 %), andererseits kann aber auf die Errichtung von öffentlichen Ladestationen wahrscheinlich nicht verzichtet werden. Gerade diese Mischstrukturen ziehen Pendler aus den umliegenden Landkreisen an, für die in jedem Fall die Nutzung öffentlicher (auf der Straße) oder halböffentlicher Ladestationen (z. B. in Parkgaragen am Arbeitsplatz) relevant erscheint. In der Megastadt Singapur wird die Komplexität beim Aufbau einer Ladeinfrastruktur als geringer im Vergleich zu Frankfurt und Ingolstadt eingestuft. Als Sonderfall einer Megastadt findet das Parken von

Fahrzeugen zum Großteil nur in Parkhäusern und Parkgaragen statt, die sich innerhalb von Wohnanlagen, Arbeitsstätten oder Freizeiteinrichtungen befinden. Eine Elektrifizierung von Parkhäusern als Knotenpunkte für die Ladeinfrastruktur erscheint in Singapur als relativ problemlose Möglichkeit, Elektrofahrzeuge zu integrieren. Singapur stellt mit seiner Parkraumstruktur einen besonderen Fall dar und hebt sich damit deutlich von anderen asiatischen oder US-amerikanischen Megastädten ab (Bewertung hoch).

Bei der Betrachtung des Kriteriums der Energiestruktur zeigt erneut der ländliche Raum deutliche Vorteile. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass in Schöllnach eine Integration von erneuerbaren Energien deutlich einfacher zu bewerkstelligen ist als in Frankfurt am Main, Ingolstadt oder Singapur. Im ländlichen Raum bieten sich aufgrund der weniger dichten Bebauung diverse Möglichkeiten, Ladestrom durch Eigenproduktion zu erzeugen. Große Potentiale bietet dabei neben der Biomasse die Nutzung der Photovoltaik (Bewertung der Integration hinsichtlich Energiestruktur: sehr hoch). Auch Frankfurt und Ingolstadt schneiden bei der Bewertung der Energieinfrastruktur bezüglich der Integration von Elektrofahrzeugen sehr gut ab. Beide Regionen bergen ebenfalls ein hohes Potential für Photovoltaik, das vor allen Dingen in den ländlicheren Bereichen der Stadt sinnvoll mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen kombiniert werden kann. Dabei besteht bei ausgewählten Gebäuden zusätzlich die Möglichkeit, das Elektrofahrzeug selbst in das zukünftige Hausenergiesystem (dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung) zu integrieren (Bewertung: hoch). In Singapur ist bei der Einbindung von erneuerbaren Energien mit deutlichen Einschränkungen zu rechnen. Dies ist unter anderem den geografischen und meteorologischen Verhältnissen in Südost-Asien geschuldet. Dennoch kann unter der vollständigen Ausnutzung des Photovoltaikpotentials ein weiterer Beitrag zur Emissionsreduktion geleistet werden (Bewertung: niedrig).

Wie die Abschätzungen für Ladeinfrastrukturkosten gezeigt haben, lässt sich in Schöllnach eine private Ladeinfrastruktur verhältnismäßig kostengünstig in großem Maßstab aufbauen. Die Kosten liegen bei optimistischen Schätzungen – für den Bevölkerungsanteil mit Zugang zu Privatstellplätzen – bei etwa 70 Euro pro Kopf (Bewertung hinsichtlich Infrastrukturkosten: sehr hoch). Da Singapur nur über eine sehr geringe Anzahl an privaten Garagenstellplätzen verfügt, ist der Aufbau von privaten Ladestationen, die von einem Pkw exklusiv genutzt werden, keine Option. Hier muss auf den Aufbau von Stationen innerhalb von Parkgaragen übergegangen werden. Die Investitionen hierfür sind jedoch relativ hoch, da vor allem in Freizeiteinrichtungen ein Zurückgreifen auf hohe Ladeleistungen und damit teure Stationen notwendig

wird. Um 10 % aller Pkw in Singapur elektrisch zu betreiben (Laden in Parkgaragen), sind bereits mehr als 160 Mio. Euro zu investieren (Bewertung: niedrig). Dennoch ist die Integration besonders durch das aggregierte Abstellen von Pkw in großen Parkplatzanlagen in Singapur wie auch durch das Parken in privaten Garagen in Schöllnach vermutlich wesentlich einfacher zu bewerkstelligen als der Aufbau von Ladeinfrastrukturen in den ländlich und städtisch gleichermaßen charakterisierten Regionen Frankfurt am Main und Ingolstadt. Aufgrund der beschriebenen Merkmale und der Notwendigkeit des Errichtens unterschiedlicher Arten von Ladestationen (privat, halböffentlich und öffentlich) dürften die spezifischen Kosten hierfür deutlich höher ausfallen als in Schöllnach oder Singapur. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Komplexität deutlich zunimmt (Bewertung: mittel).

Analog zu zahlreichen Großstädten und insbesondere zu asiatischen Megastädten sind Aspekte der Emissionsreduktion auch für Singapur relevant. Wenn auch die fahrzeugspezifischen Emissionen weit hinter denen chinesischer Städte zurückliegen, kann durch die Integration von elektrisch betriebenen Pkw ein weiterer Schritt in Richtung eines umweltverträglichen Verkehrs getan werden. Dies ergibt vor allem im Kontext der Einbindung erneuerbarer Energien Sinn, wie die Untersuchungen gezeigt haben. In jedem Fall kann die dicht besiedelte Stadt Singapur von der Reduktion der Lärmemissionen profitieren (Bewertung hinsichtlich Emissionsreduktion: sehr hoch). Frankfurt und auch Ingolstadt bieten ebenfalls hohe Emissionsreduktionspotentiale. In großen Straßen kann durch die lokale Emissionsfreiheit von Elektrofahrzeugen und die dadurch resultierende Senkung von Schadstoffen ein Erfolg verbucht werden. Auch in deutschen Städten werden regelmäßig Feinstaubgrenzen überschritten, wie das Beispiel Stuttgart zeigt (z. B. im Januar 2016). In Schöllnach ist der Umweltnutzen mit Blick auf die Emissionen durch Elektromobilität als durchschnittlich einzustufen (Bewertung: mittel). Durch die lokale Erzeugung von Strom beispielsweise durch den verstärkten Einsatz von Klein-BHKW-Anlagen mit einer innovativen Verbindung zur Nutzung von Elektro-Pkw in Frankfurt, Ingolstadt oder Schöllnach können die Emissionen sogar einen Anstieg verzeichnen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Die Integration von Elektrofahrzeugen in Singapur stellt auf langfristige Sicht eine interessante Alternative zur herkömmlichen Mobilität dar. Eine Integration von Photovoltaikanlagen zusammen mit der verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen wird zu einer Senkung der Importabhängigkeit (Rohöl) und der im Verkehrssektor entstehenden Emissionen führen. Dennoch können die eingeschränkten Potentiale erneuerbarer Energien die Importabhängigkeit nicht dauerhaft verringern. Auch in [141]

wurde gezeigt, dass eine Einbindung großer Photovoltaikanteile in das Singapur Energiesystem sehr effizient geschehen kann und kombiniert mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen CO₂-Emissionen signifikant reduziert werden können. Kommen zum Laden von Elektrofahrzeugen intelligente Ladestrategien zum Einsatz, ergeben sich weitere positive Aspekte bezüglich der Emissionsreduktionspotentiale. Selbst unter Berücksichtigung des konventionellen Kraftwerksparks (Erdgas und Erdöl) und einer Durchdringung mit Elektro-Pkw von 100 % erfahren die zusätzlichen Kosten und Emissionen nur einen vergleichsweise geringen Anstieg, der sich unter Nutzung von intelligenten Ladestrategien weiter reduzieren lässt. Wird darüber hinaus der Aspekt der Regelleistungsbereitstellung miteinbezogen, könnten Elektrofahrzeuge in Singapur bis zu 225 MW Regelleistung anbieten und durch gesteuertes Laden die Menge an integrierbarer Photovoltaikkapazität erhöhen. [141] Insgesamt lässt sich ableiten, dass sowohl eine parallele Entwicklung als auch eine gemeinsame Einbindung alternativer Antriebstechnologien und erneuerbarer Energien in Singapur zukünftig sinnvoll sind. Elektrofahrzeuge stellen neuartige Verbraucher dar, die durch eine flexible Nachfrage charakterisiert sind. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten, beispielsweise eine Plattform für Demand-Response-Maßnahmen zu schaffen. Diese Maßnahmen sind im Vergleich zu etablierten Technologien einfacher in neuartige Technologien zu integrieren. Durch den gemeinsamen Aufbau und die Integration der Elektromobilität und Photovoltaik ergeben sich Synergien, die zukünftig stärker genutzt werden sollten. Dies ermöglicht den Aufbau eines Technologieclusters, der den gemeinsamen kombinierten Infrastrukturaufbau (Energie und Mobilität) beinhaltet und die Grundlage für ein Smart Grid in Singapur bereiten kann.

Frankfurt und Ingolstadt zeigen grundsätzlich ähnliches Verhalten. Relativ betrachtet sind der Anteil an privaten Stellplätzen und damit die Möglichkeit, private Ladestationen zu betreiben, auf ähnlich hohem Niveau. Die Elektromobilität kann in Verbindung mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen für Strom und Wärme ein wichtiger Baustein der zukünftigen Energieversorgung in geeigneten Gebäuden in Frankfurt und Ingolstadt darstellen. Dennoch muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass in Frankfurt mit S- und U-Bahn-Angeboten bereits elektromobile Komponenten in der Stadt vorhanden sind, die eine Durchführung der Alltagsmobilität erlauben. Ingolstadt ist noch in stärkerem Maße als Frankfurt am Main von einer Mischstruktur (Land/Stadt) geprägt. Dies erlaubt in weiten Teilen einen verhältnismäßig kostengünstigen Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur. Insgesamt kann Ingolstadt – wie auch Frankfurt am Main – als Pendlerstadt bezeichnet werden. Aufgrund des großen Anteils des produzierenden Gewerbes und der bedeutenden Rolle als Automobil- und Raffineriestandort ist die Arbeitsplatzdichte in Ingolstadt sehr hoch. Dies führt

zu einem überdurchschnittlich hohen Pendlersaldo von 36.550 und verdeutlicht die Stellung Ingolstadts als wichtiges Zentrum innerhalb Bayerns. Bei derart gestalteten Strukturen ist eine Dualität mit umliegenden Ortschaften festzustellen. Ein Zentrum mit hoher Arbeitsplatzdichte sowie einem hohen Pendlersaldo wird zur Einpendlerstadt und bietet umliegenden kleineren Gemeinden, die strukturschwächer gestaltet sind und somit zu Auspendlerorten werden, Beschäftigungsmöglichkeiten an. Zudem ist auffallend, dass aufgrund vieler ansässiger Unternehmen große Parkplatzflächen existieren, deren Nutzung (von Elektro-Pkw) zusammen mit z. B. Photovoltaikanlagen einen entscheidenden Beitrag zur Einbindung von Elektrofahrzeugen leisten könnte. Die vorhandenen Pendlerverflechtungen zwischen kleineren Ortschaften wie Schöllnach und Städten wie Frankfurt oder Ingolstadt können Vorteile bei der Integration der Elektromobilität bieten und alternative Antriebstechnologien von ländlich geprägten Strukturen in große Städte transferieren.

Für Schöllnach ist das dominante Fortbewegungsmittel der Pkw, der in absehbarer Zeit nicht sinnvoll ersetzt werden kann. Somit ist Schöllnach ein interessanter Kandidat für die verstärkte Nutzung von Elektrofahrzeugen. Die empirisch ermittelten Daten zum Mobilitätsverhalten ländlicher Gemeinden zeigen, dass die pro Tag durchschnittlich gefahrenen Distanzen die Nutzung eines Elektrofahrzeuges sehr wohl zulassen würden und im Vergleich zur Situation in Städten die Erhöhung der Weglängen nur moderat ausfallen. Selbst bei alleiniger Aufladung der Fahrzeugbatterie an der heimischen Steckdose ohne die Nutzungsmöglichkeit einer Ladestation am Arbeits- oder Ausbildungsplatz sind die durchschnittlichen Batteriekapazitäten zur Bewältigung der Alltagsmobilität in den allermeisten Fällen ausreichend. So ist im ersten Schritt eine vergleichsweise einfache Realisierung einer Ladeinfrastruktur denkbar. Der Aufbau öffentlicher Ladesäulen ist nicht notwendig, zumindest nicht zur alltäglichen Nutzung durch die Gemeindebevölkerung. Ein großer Vorteil ländlicher Regionen ist in der Energieinfrastruktur zu sehen. Im weniger dicht besiedelten Schöllnach ist Strom aus erneuerbaren Energien wesentlich einfacher bereitzustellen als in den anderen Untersuchungsregionen. Pro Kopf kann eine größere Menge an regenerativen Energien integriert werden. Dies kann insbesondere für Singapur nicht und für Frankfurt und Ingolstadt nur in geringerem Maße festgestellt werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der ländliche Raum in der Diskussion um die Integration der Elektromobilität in jedem Fall Platz finden muss. Dies trifft zudem auch für sehr große Städte wie Singapur zu. Elektrisch betriebene Fahrzeuge können nicht nur als Megacity Vehicle eingesetzt werden, sondern sind durchaus auch für den ländlichen Raum attraktiv.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Eignung verschiedener Raum- und Siedlungsstrukturen für die Integration von Elektrofahrzeugen anhand der vier Fallbeispiele Singapur, Frankfurt am Main, Ingolstadt und Schöllnach. Ziel ist neben der Beschreibung der Rolle der Elektromobilität in zukünftigen Energiesystemen die Erarbeitung und Ableitung grundlegender Aussagen zum Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur unter Rücksichtnahme auf mehrere Kriterien. Diese Beurteilung umfasst in der Hauptsache die Aspekte Verkehrs- und Parkraumstruktur, Energiestruktur und Abschätzungen zu Ladeinfrastrukturkosten. Zudem sollen Wechselwirkungen zwischen den Räumen verdeutlicht werden.

Die Untersuchungsregionen sind so gewählt, dass eine möglichst große Bandbreite von Raum- und Siedlungsstrukturen abgedeckt wird. Mit Singapur wird neben den drei deutschen Standorten auch eine asiatische Megastadt ausgewählt, die zunächst für einen Vergleich mit drei Untersuchungsgebieten in Deutschland problematisch erscheint. Trotz der Sonderstellung weist die Stadt Singapur jedoch typische Merkmale einer Megastadt auf und ist somit ein geeigneter Kandidat für diese Studie.

Für die Untersuchungen kamen unterschiedliche Methoden und Vorgehensweisen zur individuellen Analyse der Fallbeispiele zum Einsatz. Grundlage bilden zum einen Raummodelle, die Aussagen zur Mobilität in den Regionen erlauben. Unter Einbeziehung digitaler Geodaten wie Gebäudepolygone und Informationen zum Straßennetz sowie soziodemographischer Daten konnte damit die Parkplatzstruktur auf öffentlichen Straßen, in Privatgaragen oder öffentlichen Parkhäusern für jede Region abgebildet und bewertet werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zum anderen räumliche Energiemodelle entwickelt und eingesetzt, um die Wechselwirkungen zwischen Nutzung von Elektrofahrzeugen und Einsatz erneuerbarer Energien zu diskutieren. Hier bilden die Basis erneut digitale Daten, mit deren Hilfe Potentiale der erneuerbaren Energien (z. B. Photovoltaik, Wärmepumpen, Klein-BHKW-Anlagen) bestimmt und verortet dargestellt werden können. Die energetische Modellierung fußt zudem auf dem Modellgenerator TIMES, der eine Optimierung von Energiesystemen durchführt (Anwendung für Singapur und Ingolstadt). Darüber hinaus waren empirische Methoden Bestandteil dieser Arbeit. Mithilfe von Objektzählungen und einer fragebogenbasierten Mobilitätsumfrage konnte das Verkehrs- und Mobilitätsverhalten der ländlichen Gemeinde Schöllnach abgeschätzt werden. Die Struktur der

Umfrage setzte sich im Wesentlichen aus Fragen zum Haushalt, zur Person und zur Mobilität der Schöllnacher Bürger zusammen.

Zusammenfassend können aus den in dieser Arbeit ermittelten Ergebnissen für die Fallbeispiele unter Berücksichtigung der genannten Kriterien wesentliche Empfehlungen abgeleitet werden:

Elektrofahrzeuge eignen sich im Allgemeinen sehr gut für den Einsatz im ländlichen Raum. Für Schöllnach ist der Pkw die tragende Säule der Mobilität, sodass auf absehbare Zeit auf die Individualmobilität nicht zu verzichten ist. Dies ist ein klarer Standortvorteil der Elektromobilität für den ländlichen Raum. Zudem eignet sich die hohe Zahl an privaten Garagenstellplätzen im ländlichen Schöllnach hervorragend, um kostengünstig eine private Ladeinfrastruktur aufzubauen. Gleichzeitig birgt der ländliche Raum große Potentiale für erneuerbare Energien, die einfacher im Vergleich zur Stadt integriert werden können.

Singapur ist ebenfalls als idealer Standort zur Integration von Elektrofahrzeugen einzustufen. Die Stadt weist jedoch unter allen Untersuchungsregionen das diversifizierte Verkehrsangebot auf (Bus, Schnellbahn, Taxi). Eine Nutzung des privaten Pkw ist demnach zur Bewältigung der Alltagsmobilität nicht notwendig. Aufgrund der besonderen Parkplatzstruktur (nahezu alle Pkw parken in Parkhäusern) ist eine Elektrifizierung der Parkstandorte und somit der Aufbau einer Ladeinfrastruktur vergleichsweise einfach, jedoch nur unter hohem Kostenaufwand, zu realisieren. Ein Nachteil der südost-asiatischen Stadt ist sicherlich das begrenzte Potential der erneuerbaren Energien, das jedoch unter vollständiger Ausnutzung positive Effekte auf die Emissionsreduktion zeigt.

Die Fallbeispiele Frankfurt am Main und Ingolstadt ähneln sich sehr in ihrer Charakteristik. Beide Regionen prägen sowohl ein städtisches Zentrum als auch kleinere ländlich gestaltete Stadtteile und Ortschaften auf dem Stadtgebiet. Frankfurt bietet jedoch mehr Auswahlmöglichkeiten hinsichtlich der Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs. Der Parkraum beider Regionen ist gemischt gestaltet. Es existiert vor allem in weniger dicht besiedelten Arealen eine große Anzahl privater Garagenstellplätze (private Ladeinfrastruktur). Der Aufbau einer öffentlichen Infrastruktur und die Nutzung halböffentlicher Ladeeinrichtungen werden jedoch zusätzlich erforderlich sein. Dieser Umstand wird Auswirkungen auf die Investitionen für den Ausbau der Ladeinfrastruktur haben. Das Potential vor allem der Photovoltaik ist für beide Fallbeispiele als hoch anzugeben und kann in Verbindung mit Elektrofahrzeugen eine interessante Alternative darstellen. Auch der Punkt der Pendlerverflechtungen beider

Städte mit dem Umland und kleinerer ländlicher Gemeinden ist relevant im Hinblick auf die Nutzung von Elektrofahrzeugen.

Langfristig wird die Elektromobilität in jedem Fall in Singapur eine relevante Rolle spielen. Der Sondercharakter dieser Region kann von der Integration elektromobiler Antriebskonzepte zusammen mit der Nutzung erneuerbarer Energien profitieren. Eventuell wird die Elektromobilität in Städten wie Frankfurt am Main oder Ingolstadt in Zukunft nicht die erste Wahl sein, wenn es um die Bewältigung der Alltagsmobilität geht. Ganz entscheidend zur verstärkten Einbindung der Elektromobilität dürfte jedoch der ländliche Raum beitragen, der über die Nutzung von Elektrofahrzeugen in den Pendlerverflechtungen die Brücke zu Städten wie Ingolstadt schlagen kann. Beide Strukturen bzw. Regionen können dadurch gewinnen. So könnte der ländliche Raum das Elektrofahrzeug zum Fortbewegungsmittel der Zukunft auch in Städten sowie zu einem wichtigen Baustein der Elektromobilität antreiben.

Abschließend sollen an dieser Stelle ausblickend einige Aspekte angeführt werden, die zur Optimierung der Vorgehensweisen in dieser Studie beitragen könnten:

- Grundsätzlich basiert diese Arbeit auf unterschiedlichen Methoden und Vorgehensweisen, die für jede Region individuell abgestimmt sind. Der Fokus bei der Bewertung einzelner Kriterien ändert sich so zum Teil von Region zu Region. Zukünftig könnten die einzelnen Analysen in eine umfassende Umgebung integriert und zusammengeführt werden, sodass für sämtliche Regionen mittels generischer Raum- und Energiemodelle Ergebnisse in einfacherer Weise ermittelt werden können.
- Die Untersuchungen und Analysen basieren teilweise auf Annahmen und Abschätzungen. Diese wurden dann getroffen, wenn keine zufriedenstellende Datengrundlage vorhanden oder die Datenqualität nicht ausreichend war. Dies ist vor allen Dingen bei der Ermittlung der Ladeinfrastrukturkosten der Fall. Eine genauere Analyse der Investitionskosten für die Untersuchungsregionen Frankfurt und Ingolstadt ist in jedem Fall empfehlenswert. Hier sollte ein Schwerpunkt auch auf die Ermittlung der notwendigen öffentlichen Ladeinfrastruktur durch Analyse des Nutzer- und Fahrverhaltens gelegt werden.
- Bei der Ermittlung der Parkraumstruktur und der zur Verfügung stehenden Parkstände und Stellplätze innerhalb der Regionen wurde von statischen Zuständen ausgegangen. Hier ist zu empfehlen, die zeitliche Dimension in stärkerem Maße zu berücksichtigen, um die Fluktuation von Pkw innerhalb des Stadtgebietes miteinzubeziehen. Dies ist auch entscheidend bei einer exakten Bestimmung der notwendigen öffentlichen Ladeinfrastruktur.

- Ein letzter interessanter Aspekt zielt auf die Ermittlung der Potentiale erneuerbarer Energien wie beispielsweise des PV-Potentials ab. Dies ist in dieser Arbeit aufwendig unter Zuhilfenahme digitaler Geodaten und Solareinstrahlungsmodellen durchgeführt worden. Durch neue Projekte, wie beispielsweise „Project Sunroof“ von Google, das als (weltweiter) Solarkataster fungiert, könnten derartige Ermittlungen jedoch automatisiert für beliebige Regionen geschehen. Dadurch kann Rechen- und Entwicklungszeit eingespart werden. Denkbar wäre an dieser Stelle zusätzlich eine Kopplung des Solarkatasters mit Informationen zum Fahrverhalten eines Nutzers zur Bestimmung der optimalen Versorgung des Elektrofahrzeuges mit dezentral erzeugtem PV-Strom. Eine Ausweitung auf die Bewertung weiterer regenerativer Energiequellen ist hier ebenfalls denkbar.

Anhang: Fragebogen zum Mobilitätsverhalten in Schöllnach

Umfrage zum Mobilitätsverhalten in Schöllnach

IFE Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
Ordinarius Prof. Dr.-Ing. U. Wagner · Prof. Dr. rer. nat. Th. Hamacher (komm.)



Liebe Bürgerinnen und Bürger der Gemeinde Schöllnach,

die Elektromobilität kann zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung des Verkehrs und der Energiewende in Deutschland liefern. Seit einigen Jahren spielen elektrisch angetriebene Fahrzeuge eine zunehmende Rolle. Sie sind umweltfreundlich und stoßen keine Lärm- und CO₂-Emissionen aus. Zudem kann der Ladestrom aus unterschiedlichen Energiequellen erzeugt werden. Nachteile sind jedoch die Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge, die nach wie vor sehr hoch sind, sowie eine unzureichend ausgebaute Ladeinfrastruktur. Vor diesem Hintergrund ergeben sich bei der Integration von Elektrofahrzeugen sowohl für Städte als auch für ländlich geprägte Gemeinden unterschiedlichste Herausforderungen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Technischen Universität München (TUM), das sich mit der Integration von Elektrofahrzeugen in unterschiedliche Raum- und Siedlungsstrukturen auseinandersetzt, wird das Mobilitätsverhalten in der Gemeinde Schöllnach untersucht. Das Mobilitätsverhalten der Bürgerinnen und Bürger bzw. der Pendlerinnen und Pendler soll dabei sowohl räumlich als auch zeitlich erfasst werden. Dies ist sinnvoll, um potentielle Maßnahmen hinsichtlich der zukünftigen Nutzung von Elektrofahrzeugen in Schöllnach ableiten und bewerten zu können (z. B. Ladeinfrastruktur).

Die Beantwortung des Fragebogens soll für jede Person erfolgen und nimmt etwa 15 Minuten Zeit in Anspruch. Alle Personen ab 6 Jahren können den Fragebogen ausfüllen. Falls nötig, können Kinder und ältere Personen beim Ausfüllen der Umfrage unterstützt werden. Bei Unklarheiten oder Fragen zum Projekt kontaktieren Sie bitte direkt Herrn Markus Wagner (Tel.: +49 89 289 23976 oder E-Mail: markus.wagner@tum.de).

Der Umfragezeitraum läuft bis zum **05.01.2015**. Weitere Fragebögen (z. B. für weitere Familienmitglieder) können im Rathaus Schöllnach bei Frau Ramona Stadler abgeholt werden. Zudem steht der Fragebogen in digitaler Form zum Ausdrucken auch unter www.schoellnach.de bereit. Den ausgefüllten Fragebogen senden Sie am besten mit dem beiliegenden Antwortumschlag zurück (Porto zahlt Empfänger). Der Fragebogen kann zudem auch im Rathaus bei Frau Stadler abgegeben oder auch per E-Mail oder Fax (+49 89 289 28313) an Herrn Wagner übersandt werden.

Die anonym erhobenen Daten werden ausschließlich für oben genanntes Forschungsprojekt genutzt und nicht an Dritte weitergegeben!

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wird um zahlreiche Teilnahme gebeten. Jeder abgegebene Fragebogen ist wichtig! Bitte nehmen Sie sich ein paar Minuten Zeit zur Beantwortung der Fragen und unterstützen Sie die Umfrage zum Mobilitätsverhalten in der Gemeinde Schöllnach!

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Bürgermeister Alois Oswald

Dipl.-Ing. Markus Wagner

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

1. Fragen zu Ihrem Haushalt

1) Wo (PLZ) oder in welchem Ortsteil von Schöllnach befindet sich Ihr Haushalt? (bitte eintragen)

PLZ:

2) Wie viele Personen leben ständig in Ihrem Haushalt, Sie selbst eingeschlossen? (bitte eintragen)

Anzahl der Personen insgesamt:

davon unter 6 Jahren: davon von 6 bis 18 Jahren: davon über 18 Jahren:

2. Fragen zu Ihrer Person

- 3) **Welches Geschlecht haben Sie?** (bitte ankreuzen)
 männlich weiblich
- 4) **Nennen Sie bitte Ihr Geburtsjahr!** (bitte eintragen)
 [] [] [] [] []
- 5) **Wie ist Ihr Familienstand?** (bitte ankreuzen)
 verheiratet/eingetragene Partnerschaft verheiratet, aber getrennt lebend ledig
 nicht verheiratet, mit Partner lebend geschieden/getrennt lebend verwitwet keine Angabe
- 6) **Wo arbeiten Sie?/Wo gehen Sie zur Schule?** (bitte ankreuzen/eintragen)
 im Kernort Schöllnach, außerhalb des Hauses anderer Ortsteil/Ort (PLZ): _____
 ich führe den Haushalt/ich arbeite zuhause ich arbeite nicht/nicht mehr
- 7) **Wenn Sie außerhalb Ihres Hauses arbeiten/zur Schule gehen, wie sind Ihre Arbeitszeiten/Unterrichtszeiten?** (bitte eintragen)
 von [] [] [] [] Uhr bis [] [] [] [] Uhr
- 8) **Welche Führerscheinklasse(n) besitzen Sie?** (bitte ankreuzen, Mehrfachnennung möglich)
 Pkw Kleinkrafttrad (Moped/Roller bis 50 ccm) Leichtkrafttrad (bis 125 ccm)
 Motorrad ich besitze keinen Führerschein
- 9) **Besitzen Sie eine Zeitfahrkarte (Abo, Monats-, Wochenkarte) für den öffentlichen Personenverkehr (ÖPNV) und benutzen Sie diesen regelmäßig?** (bitte ankreuzen)
 ja nein
- 10) **Über welche Verkehrsmittel können Sie/kann Ihr Haushalt regelmäßig verfügen?** (bitte ankreuzen, Mehrfachnennung möglich)
 Pkw (Verbrennungsmotor) Pkw (Elektro-, Hybridantrieb) Dienst-Pkw
 Moped/Roller/Motorrad Fahrrad Elektrofahrrad
- 11) **Über wie viele Pkw verfügt Ihr Haushalt? Geben Sie bitte an, welchen Fahrzeugklassen Ihre Pkw ggf. zugeordnet werden können!** (bitte ankreuzen)

		Anzahl Pkw				
		0	1	2	3	4
Fahrzeugklasse	Kleinstwagen (z. B. Fiat 500, VW up!)	<input type="checkbox"/>				
	Kleinwagen (z. B. Opel Corsa, Seat Ibiza)	<input type="checkbox"/>				
	Kompaktklasse (z. B. Ford Focus, VW Golf)	<input type="checkbox"/>				
	Mittelklasse (z. B. BMW 3er, VW Passat)	<input type="checkbox"/>				
	Obere Mittelklasse (z. B. Audi A7, BMW 5er)	<input type="checkbox"/>				
	Oberklasse (z. B. BMW 7er, Mercedes-Benz S-Klasse)	<input type="checkbox"/>				
	Sportwagen (z. B. Porsche Boxster, BMW Z4)	<input type="checkbox"/>				
	Geländewagen/SUV (z. B. BMW X5, VW Touareg)	<input type="checkbox"/>				
	Elektro-/Hybrid-Pkw (alle Klassen und Hersteller)	<input type="checkbox"/>				

- 12) **Verfügen Sie über einen Pkw-Stellplatz zuhause (z. B. Garage, Carport), der mit einem Stromanschluss ausgestattet ist/ausgestattet werden könnte?** (bitte ankreuzen/eintragen)
 ja, Anzahl: [] [] [] nein
- 13) **Steht an Ihrem Arbeitsplatz ein Pkw-Stellplatz zur Verfügung?** (bitte ankreuzen)
 ja nein

3. Fragen zu Ihrer Mobilität

14) Stellen Sie sich eine durchschnittliche Woche vor. Geben Sie bitte an, welches Verkehrsmittel Sie dabei für welchen Wegezweck nutzen, indem Sie in die entsprechenden Felder möglichst genau eintragen, wie viele Wege/Woche und welche einfache Distanz in km Sie dabei durchschnittlich zurücklegen. (bitte eintragen)

Beispiel für eine durchschnittliche Woche:

- Sie fahren von Montag bis Freitag mit Ihrem Pkw von Ihrer Wohnung zu Ihrem 20 km entfernten Arbeitsplatz. Sie legen also pro Woche mit **Hin- und Rückweg 10 Wege** zu je 20 km mit dem Pkw zurück.
- Zudem fahren Sie zwei Mal pro Woche (z. B. Mittwoch und Samstag) mit dem Fahrrad zum 2 km entfernten Supermarkt. Das entspricht pro Woche **4 Wegen** zu je 2 km mit dem Fahrrad.
- Am Mittwoch gehen Sie zu Fuß zum Sportverein, der 1 km von Ihrer Wohnung entfernt liegt. Pro Woche bedeutet dies **2 Wege** zu je 1 km zu Fuß.
- In einer durchschnittlichen Woche fahren Sie als Mitfahrer mit dem Pkw z. B. samstagsabends in die 30 km entfernte Stadt (z. B. ins Kino). Dabei kommen nochmal **2 Wege** zu je 30 km mit dem Pkw (Mitfahrer) hinzu.

Ergebnistabelle für Beispiel

Wegezweck/Aktivität	genutztes Verkehrsmittel/einfache Distanz pro Zweck in km													
	Anzahl der Wege pro Woche zu Fuß	Fahrrad	Elektrofahrrad	Motorrad/Moped/Roller/Mofa	Pkw als Fahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw als Mitfahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw Elektro-, Hybridantrieb	Linienbus/Stadtbuss	Pendelbus/Firmenbus	Reisebus/Fernbus	Bahn/Fernzug	Flugzeug	Taxi	Anderes Verkehrsmittel
Arbeit/Arbeitsplatz	10				20									
Dienstreise/Wechsel Dienstort														
Bildungseinrichtung/Ausbildung (Schule, Universität etc.)														
Einkauf	4	2												
Private Erledigungen (Arzt, Post, Bank etc.)														
Familienbesuch/Besuch (fremde Wohnung)														
Sportstätte, Sporteinrichtung	2	1												
Gaststätte, Kneipe, Bar														
Kultur, Theater, Kino	2				30									
Erholung, Sport im Freien														
Sonderveranstaltung (Konzert, Sportereignis etc.)														
Anderer Aktivität														

Wegezweck/Aktivität	genutztes Verkehrsmittel/einfache Distanz pro Zweck in km													
	Anzahl der Wege pro Woche zu Fuß	Fahrrad	Elektrofahrrad	Motorrad/Moped/Roller/Mofa	Pkw als Fahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw als Mitfahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw Elektro-, Hybridantrieb	Linienbus/Stadtbuss	Pendelbus/Firmenbus	Reisebus/Fernbus	Bahn/Fernzug	Flugzeug	Taxi	Anderes Verkehrsmittel
Arbeit/Arbeitsplatz	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Dienstreise/Wechsel Dienstort	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Bildungseinrichtung/Ausbildung (Schule, Universität etc.)	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Einkauf	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Private Erledigungen (Arzt, Post, Bank etc.)	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Familienbesuch/Besuch (fremde Wohnung)	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Sportstätte, Sporteinrichtung	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Gaststätte, Kneipe, Bar	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Kultur, Theater, Kino	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Erholung, Sport im Freien	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Sonderveranstaltung (Konzert, Sportereignis etc.)	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Anderer Aktivität	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Wenn Sie den Öffentlichen Personenverkehr genutzt haben, weshalb? (bitte ankreuzen/eintragen, Mehrfachnennung möglich)

- Preis
 Unterwegszeit
 Komfort
 Sicherheit
 fehlender Parkplatz
 kein anderes Verkehrsmittel nutzbar
 Sonstiges: _____

Wenn Sie ein eigenes Fahrzeug (z. B. Pkw) genutzt haben, weshalb? (bitte ankreuzen/eintragen, Mehrfachnennung möglich)

- keine Bus-, Bahnverbindung
 ungünstige Haltestellen
 Preis
 Zeitverlust ÖPNV
 Komfortgewinn
 Umstieg notwendig
 ungünstige Fahrzeiten
 Sonstiges: _____

15) In Frage 14 ging es um die Verkehrsmittelnutzung in einer durchschnittlichen Woche. Hier geht es nun darum, welche unterschiedlichen Verkehrsmittel für Sie für bestimmte Zwecke in Frage kommen. Pro Zweck sind also mehrere Verkehrsmittel denkbar. (bitte ankreuzen, Mehrfachnennung möglich)

➤ Sollte ein Wegezweck auf Ihre Situation nicht/nicht mehr zutreffen, da Sie z. B. nicht mehr berufstätig sind und daher nicht mehr zur Arbeit fahren, kreuzen Sie bitte **nicht zutreffend** an!

		normalerweise genutztes Verkehrsmittel														
		nicht zutreffend	zu Fuß	Fahrrad	Elektrofahrrad	Motorrad/Moped/Roller/Mofa	Pkw als Fahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw als Mitfahrer (Verbrennungsmotor)	Pkw Elektro-, Hybridantrieb	Linienbus/Stadtbus	Pendelbus/Firmenbus	Reisebus/Fernbus	Bahn/Fernzug	Flugzeug	Taxi	Anderes Verkehrsmittel
Wegezweck/Aktivität	Arbeit/Arbeitsplatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Dienstreise/Wechsel Dienort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Bildungseinrichtung/Ausbildung (Schule, Universität etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Einkauf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Private Erledigungen (Arzt, Post, Bank etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Familienbesuch/Besuch (fremde Wohnung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sportstätte, Sporteinrichtung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Gaststätte, Kneipe, Bar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Kultur, Theater, Kino	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Erholung, Sport im Freien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sonderveranstaltung (Konzert, Sportereignis etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Andere Aktivität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

16) Wie viele Reisen (privat oder dienstlich) mit auswärtiger Übernachtung oder Fahrten mit mehr als 130 km einfacher Distanz haben Sie in den vergangenen 2 Monaten unternommen? (bitte ankreuzen/eintragen)

- keine
 1 oder mehrere Reisen, Anzahl:

Geben Sie bitte die entsprechenden Informationen zu Ihren durchgeführten Reisen an:

	Reise 1	Reise 2	Reise 3	Reise 4	Reise 5
Start (z. B. PLZ, Ortsteil etc.)	_____	_____	_____	_____	_____
Ziel (z. B. PLZ, Stadt, Land etc.)	_____	_____	_____	_____	_____
Hauptverkehrsmittel	_____	_____	_____	_____	_____
Entfernung einfach [km]	_____	_____	_____	_____	_____
Zweck (z. B. Urlaub, Beruf etc.)	_____	_____	_____	_____	_____

17) Sonstige Anmerkungen und Kommentare:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Primärenergieverbrauch (links) und Treibhausgasemissionen in Deutschland (rechts) nach Sektoren (Daten: [3, 4])	2
Abbildung 2.1:	Hybridklassen nach elektrischer Leistung, eigene Darstellung nach [1, 12]	10
Abbildung 2.2:	Schematische Darstellung unterschiedlicher hybrider Antriebsstränge, eigene Darstellung nach [1, 15]	12
Abbildung 2.3:	Schematische Darstellung eines batterieelektrischen Fahrzeuges, eigene Darstellung nach [14]	16
Abbildung 2.4:	Schematische Darstellung eines Brennstoffzellenfahrzeuges	17
Abbildung 2.5:	Ragone-Diagramm: Energie- und Leistungsdichten von Energiespeichern auf Zellebene, eigene Darstellung nach [12]....	19
Abbildung 2.6:	Zukünftige technologische Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, eigene Darstellung nach [12] ...	22
Abbildung 2.7:	Funktionsprinzip von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen, eigene Darstellung nach [25]	25
Abbildung 2.8:	Entwicklung des Tankstellen- und Fahrzeugbestandes in Deutschland (Daten: [30, 31]).....	29
Abbildung 2.9:	Mittlere Entfernungen zur nächstgelegenen Tankstelle differenziert nach Kreistypen des BBSR (Daten: [29])	30
Abbildung 2.10:	Überblick über unterschiedliche Ladekonzepte, eigene Darstellung nach [20, 38]	33
Abbildung 2.11:	Funktionsprinzip des induktiven Ladens, eigene Darstellung nach [39, 41]	35
Abbildung 2.12:	Abstellmöglichkeiten für Fahrzeuge differenziert nach Gemeindegröße (Daten: [47, 48])	38
Abbildung 2.13:	Öffentlich zugängliche Ladepunkte für Elektroautos differenziert nach Bundesländern (Daten: [50])	41
Abbildung 2.14:	Zahl der verfügbaren öffentlichen Ladestationen/Ladepunkte im internationalen Vergleich (Daten: [46, 50])	42
Abbildung 2.15:	Schematischer Verlauf beispielhafter Lastkurven bei ungesteuertem Laden (links) und gesteuertem Laden (rechts), eigene Darstellung nach [54]	45
Abbildung 2.16:	Pkw-Bestand in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten alternativen Kraftstoffarten (Daten: [56])	47

Abbildung 2.17:	Absatzzahlen für Elektro- und Hybridfahrzeuge in Deutschland im Jahr 2014 (Daten: [57–59]).....	48
Abbildung 2.18:	Marktanteil elektrifizierter Pkw weltweit im Vergleich zum Pkw-Bestand (Daten: [58]).....	49
Abbildung 2.19:	Verkaufszahlen in den Top-Märkten für Elektrofahrzeuge und die jeweils am stärksten vertretenen Modelle im Jahr 2013 (Daten: [57]).....	50
Abbildung 3.1:	Konzept der Stadtregion in Deutschland, eigene Darstellung nach [60]	55
Abbildung 3.2:	Methodik zur Bestimmung der erweiterten Regionstypologie, eigene Darstellung nach [69].....	59
Abbildung 3.3:	Methodik zur Bestimmung funktionaler städtischer Gebiete, eigene Darstellung nach [69].....	61
Abbildung 3.4:	NUTS-Ebenen 1 bis 3 von links nach rechts in Europa [Janner CC BY-SA 2.5].....	63
Abbildung 3.5:	Klassifizierung von Siedlungsstrukturen in Deutschland, eigene Darstellung nach [70, 75, 76].....	64
Abbildung 3.6:	Siedlungsstrukturelle Regionsgrundtypen 2009 und siedlungsstrukturelle Kreistypen 2012 in Deutschland, eigene Darstellung (Daten: [77, 78]).....	66
Abbildung 3.7:	Zentrale Mobilitätsgrößen von Kernstädten in unterschiedlichen Regionsgrundtypen und von New York (Daten: [47, 75, 79])	67
Abbildung 3.8:	Zentrale Mobilitätsgrößen von ländlichen Kreisen in unterschiedlichen Regionsgrundtypen und von New York (Daten: [47, 75, 79])	68
Abbildung 3.9:	Modal Split für Verkehrsaufkommen in unterschiedlichen Kreistypen in Deutschland und in den USA (Daten: [47, 75, 79]) .	70
Abbildung 3.10:	Startzeiten der Wege nach Wochentagen im bundesdeutschen Durchschnitt (Daten: [75]).....	71
Abbildung 3.11:	Bewegungsprofile eines typischen Haushaltes für Werktage in unterschiedlichen Regionen in Deutschland, den USA und Singapur (Daten: [75, 79]).....	72
Abbildung 3.12:	Untersuchungsregionen in Deutschland und Asien	75
Abbildung 3.13:	Bevölkerungsentwicklung in Singapur in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [82])	76
Abbildung 3.14:	Bevölkerungsentwicklung in Frankfurt in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [89])	79

Abbildung 3.15:	Bevölkerungsentwicklung in Ingolstadt in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [95, 96]).....	82
Abbildung 3.16:	Bevölkerungsentwicklung in Schöllnach in der Zeitreihe von 2000 bis 2013 (Daten: [96, 98]).....	85
Abbildung 4.1:	Übersicht über die in dieser Arbeit angewandten Methoden und Vorgehensweisen	89
Abbildung 4.2:	Modellierungsmethodik im geografischen Informationssystem zur Ermittlung der Parkplatz- und Parkflächenstruktur in den Untersuchungsregionen	91
Abbildung 4.3:	Beispielhafte Verteilung der lageabhängigen mittleren Wohnflächen pro Einwohner (links) sowie der lageabhängigen Motorisierungsgrade für Pkw (rechts) (Daten: [89]).....	92
Abbildung 4.4:	Modellierung von Energiepotentialen im Rahmen der Erstellung eines Energienutzungsplanes	95
Abbildung 4.5:	Ausschnitt eines einfachen Netzwerkdiagramms bzw. Referenzenergiesystems	98
Abbildung 4.6:	Referenzenergiesystem für Singapur.....	100
Abbildung 4.7:	Stichprobenzusammensetzung nach Altersklassen und Geschlecht	103
Abbildung 5.1:	Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Singapur (Daten: [109]).....	109
Abbildung 5.2:	Begrenzte Parkmöglichkeiten am Straßenrand in Singapur (links) und Unterbringung von Pkw in Parkgaragen (rechts) (Fotos: M. Wagner (2011), K. Schönsteiner (2015))	111
Abbildung 5.3:	Parkstandorte zuhause, am Arbeitsplatz und während der Freizeit für die Städte Singapur, Manila und Peking (Daten: [111])	112
Abbildung 5.4:	Klassifizierung von Gebäuden in Singapur (Daten: [112])	113
Abbildung 5.5:	Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Singapur	116
Abbildung 5.6:	Entwicklung der Stromerzeugung und des Strombedarfs in Singapur (Daten: [114, 115])	118
Abbildung 5.7:	Installierte Kraftwerkskapazität in Singapur (Daten: [114, 115, 118, 119]).....	119
Abbildung 5.8:	Durchdringungsraten unterschiedlicher Verkehrsträger im Falle des BEV als dominante Antriebstechnologie.....	122
Abbildung 5.9:	Durchdringungsraten unterschiedlicher Verkehrsträger im Falle des FCEV als dominante Antriebstechnologie.....	123

Abbildung 5.10:	Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO ₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 1	125
Abbildung 5.11:	Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO ₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 2	127
Abbildung 5.12:	Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO ₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 3	129
Abbildung 5.13:	Entwicklung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen (CO ₂) im Verkehrssektor in Singapur für KWP 4	131
Abbildung 5.14:	Spezifische CO ₂ -Emissionen pro km in unterschiedlichen Pfaden und Antriebstechnologien am Beispiel Singapur	132
Abbildung 5.15:	Prozentuale Veränderung des Primärenergiebedarfs und der CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Szenarien gegenüber dem Basisjahr 2010 im Gesamtenergiesektor in Singapur	133
Abbildung 5.16:	Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Frankfurt am Main (Daten: [75, 125])	135
Abbildung 5.17:	Anteile der Wegezwecke am Verkehrsaufkommen (links) sowie die Anzahl der in Haushalten verfügbaren Pkw (rechts) (Daten: [75, 125])	136
Abbildung 5.18:	Verteilung der Weglängen in Frankfurt am Main (Daten: [75, 125])	137
Abbildung 5.19:	Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen im ländlichen (Harheim, links) sowie in Parkgebäuden und Parkplätzen im städtischen Frankfurt (Stadtkern/Bahnhofsviertel, rechts) (Datengrundlage: [126])	138
Abbildung 5.20:	Bevölkerungsdichte in Frankfurt am Main mit einer Auflösung von 200 m (Datengrundlage: [126])	139
Abbildung 5.21:	Pkw-Dichte in Frankfurt am Main mit einer Auflösung von 100 m (Datengrundlage: [126])	140
Abbildung 5.22:	Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Frankfurt am Main ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [126], OpenStreetMap)..	141
Abbildung 5.23:	Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Frankfurt am Main unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Daten: [126], OpenStreetMap)	142
Abbildung 5.24:	Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Frankfurt am Main	143

Abbildung 5.25: Theoretische Eignung von Gebäuden für Klein-BHKW-Anlagen in Frankfurt am Main (Daten: [126]).....	146
Abbildung 5.26: Photovoltaikpotential in Frankfurt am Main in 200 x 200 m-Raster (Daten: [126]).....	148
Abbildung 5.27: Theoretische Eignung von Flurstücken bzw. Gebäuden für Wärmepumpen (Flächenkollektoren) in Frankfurt am Main (Daten: [126]).....	150
Abbildung 5.28: Modal Split für das Verkehrsaufkommen (Wege) in Ingolstadt (Daten: [133]).....	151
Abbildung 5.29: Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen im ländlichen (Gerolfing, links) sowie in Parkgebäuden und Parkplätzen im städtischen Ingolstadt (Stadtkern, rechts) (Datengrundlage: [134])	152
Abbildung 5.30: Bevölkerungsdichte in Ingolstadt mit einer Auflösung von 200 m (Datengrundlage: [134]).....	153
Abbildung 5.31: Pkw-Dichte in Ingolstadt mit einer Auflösung von 100 m (Datengrundlage: [134]).....	154
Abbildung 5.32: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Ingolstadt ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [134], OpenStreetMap)	155
Abbildung 5.33: Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Ingolstadt unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: [134], OpenStreetMap)	156
Abbildung 5.34: Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Ingolstadt.....	157
Abbildung 5.35: Theoretische Eignung von Gebäuden für Klein-BHKW-Anlagen in Ingolstadt [101].....	161
Abbildung 5.36: Photovoltaikpotential in Ingolstadt in 200 x 200 m-Raster [101]	162
Abbildung 5.37: Prinzipielle Eignung von Gebäuden für Grundwasser-Wärmepumpen in Ingolstadt auf Basis von Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten [101]	164
Abbildung 5.38: Theoretische Eignung von Gebäuden für Wärmepumpen (Flächenkollektoren) in Ingolstadt [101]	165
Abbildung 5.39: Kombiniertes Modal Split der gezogenen Stichprobe.....	169
Abbildung 5.40: Mobilitätsverhalten im Alltag (Arbeits- und Ausbildungswege) der befragten Gemeindebevölkerung in Schöllnach.....	171
Abbildung 5.41: Weglängen der Schöllnacher Stichprobe differenziert nach Wegezwecken im Vergleich zu deutschen Mittelwerten (Daten: [75]).....	173

Abbildung 5.42:	Fern- und Dienstreiseverhalten der befragten Gemeindebevölkerung in Schöllnach	174
Abbildung 5.43:	Wegestarts für Arbeits- und Ausbildungswege der in der Stichprobe enthaltenen Personen.....	175
Abbildung 5.44:	Standzeit der von den Befragten genutzten Fahrzeuge und beispielhafte Ladezeiten bei Nutzung eines Elektrofahrzeuges für Fahrten zum Arbeits- oder Ausbildungsplatz.....	176
Abbildung 5.45:	Anzahl der parkenden Pkw in Schöllnach auf Basis des Gesamtortes.....	177
Abbildung 5.46	Ergebnisse der empirisch durchgeführten Parkraumanalyse in Schöllnach differenziert nach Straßen	178
Abbildung 5.47:	Räumliche Darstellung der empirisch durchgeführten Parkraumanalyse in Schöllnach anhand zweier Zeitpunkte (Straßendaten: OpenStreetMap)	179
Abbildung 5.48:	Stellplätze in Einzel- und Doppelgaragen sowie auf Parkplatzflächen in der ländlichen Gemeinde Schöllnach	180
Abbildung 5.49:	Bevölkerungsdichte in Schöllnach mit einer Auflösung von 50 m	181
Abbildung 5.50:	Pkw-Dichte in Schöllnach mit einer Auflösung von 25 m.....	182
Abbildung 5.51:	Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Schöllnach ohne Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: OpenStreetMap).....	183
Abbildung 5.52:	Potentielle Belastung der Straßen durch Straßenparken in Schöllnach unter Berücksichtigung von Garagenstellplätzen (Datengrundlage: OpenStreetMap).....	184
Abbildung 5.53:	Pkw-Bestand und nutzbare Parkmöglichkeiten in Schöllnach...	185
Abbildung 5.54:	Einfache Abschätzung des PV-Potentials nach [100] für den Kernort der Gemeinde Schöllnach.....	187
Abbildung 5.55:	Potentielle Durchdringung von Elektrofahrzeugen sowie Investitionskosten bei der Nutzung vorhandener privater Garagenstellplätze in den Untersuchungsregionen	191
Abbildung 5.56:	Investitionskosten für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur in verschiedenen Typen von Parkgaragen in Singapur unter Annahme einer 10-prozentigen Durchdringung mit Elektrofahrzeugen	196

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kennzahlen beim kabelgebundenen Laden von Elektrofahrzeugen einschließlich PHEV (Daten: [39]).....	34
Tabelle 3.1:	Hierarchieebenen der Europäischen Union am Beispiel Deutschlands (Daten: [73, 74])	64
Tabelle 3.2:	Beschäftigte über 15 Jahren in Singapur für 2013 und 2014 (Daten: [85])	77
Tabelle 3.3:	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Frankfurt am Main für 2012 und 2013 (Daten: [89]).....	80
Tabelle 3.4:	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Ingolstadt für 2011 und 2012 (Daten: [95])	83
Tabelle 3.5:	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte in Schöllnach für 2011 und 2012 (Daten: [98])	86
Tabelle 4.1:	Datengrundlagen aus der Mobilitätsbefragung in Schöllnach.....	106
Tabelle 5.1:	Installierte Photovoltaikanlagen in Singapur (Daten: [114])	120
Tabelle 5.2:	Gesamtstrommix im Versorgungsgebiet der Mainova (Daten: [128])	145
Tabelle 5.3:	Strommix im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Ingolstadt für das Jahr 2013 (Daten: [101])	159
Tabelle 5.4:	Zentrale Mobilitätskenngrößen der Gemeinde Schöllnach basierend auf der gezogenen Stichprobe	167
Tabelle 5.5:	Kosten für Komponenten einer privaten Ladeinfrastruktur (konduktiv; 3,6 kW).....	191
Tabelle 5.6:	Kosten für Komponenten der Ladeinfrastruktur für Parkgaragen in Singapur (konduktiv; 3,6 kW, 7,2 kW und 11,0-22,2 kW).....	195
Tabelle 6.1:	Bewertung der untersuchten Fallbeispiele in Hinblick auf die Integration und Nutzung von Elektro-Pkw	199

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen, 4. Auflage. Renningen 2007.
- [2] Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU): Kleine Geschichte der Elektromobilität. URL: <http://www.vku.de/energie/elektromobilitaet0/kleine-historie.html>. Abrufdatum 30.08.2015.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, 1. Auflage. Berlin 2014.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin 2015.
- [5] BMW AG: BMW i. URL: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/bmw-i/philosophy.html>. Abrufdatum 15.09.2015.
- [6] TUM CREATE Limited. URL: <http://www.tum-create.edu.sg/>. Abrufdatum 20.03.2016.
- [7] Bundesverband eMobilität e. V.: Modellregionen. In: Neue Mobilität 1 (2010) 1, S. 73–78.
- [8] Bayern Innovativ, Bayerische Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer mbH; Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH: Schaufenster Elektromobilität. URL: <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/>. Abrufdatum 14.09.2015.
- [9] Technische Hochschule Deggendorf: Projekt E-Wald - Elektromobilität Bayerischer Wald. URL: <https://www.th-deg.de/de/forschung/projekte/e-wald>. Abrufdatum 14.09.2015.
- [10] Modellkommune Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen: e-GAP. URL: <http://www.e-gap.de/>. Abrufdatum 14.09.2015.
- [11] Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH: Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungsstand und Forschungsbedarf. Stuttgart 2013.
- [12] Wallentowitz, H.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen, 2. Auflage. Wiesbaden 2011.
- [13] Schöppe, D.; Zhang, H.; Kapphahn, F.; Schmidt, C.: Designing the Future with Clean Power. Analysis and Strategic Solution Concepts on Powertrain System Level, Vortrag Aachen Colloquium. Aachen 2012.
- [14] Eckstein, L.: Unkonventionelle Fahrzeugantriebe. Aachen 2010.

- [15] Blessing, U. C.: Die Plattform für alternative Antriebe. Hybrid-Varianten. URL: <http://hybrid-autos.info/>. Abrufdatum 10.12.2014.
- [16] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft, 2. Auflage. Wien 2014.
- [17] Wagner, M.; Gohla-Neudecker, B.; Wagner, U.: Energetische Quantifizierung des Heizenergiebedarfs einer Elektrofahrzeugflotte. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 61 (2011) 8, S. 38–41.
- [18] Toyota Deutschland GmbH: Die Mobilitätsrevolution kommt auf die Straße. Serien-Brennstoffzellenfahrzeug heißt Toyota Mirai. URL: <http://www.toyota-media.de/Article/view/2014/11/18/Die-Mobilitaetsrevolution-kommt-auf-die-Strasse/13177?c=toyota&m=1153>. Abrufdatum 22.05.2015.
- [19] Paschke, D.: Green-Motors.DE. Erst 2017: Daimlers Wasserstoffauto kommt zwei Jahre später. URL: <http://www.green-motors.de/news/1407142494-erst-2017-daimlers-wasserstoffauto-kommt-zwei-jahre-spaeter>. Abrufdatum 22.05.2015.
- [20] Peters, A.; Doll, K.; Kley, F.; Möckel, M.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M.; Zanker, C.: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Innovationsreport. Berlin 2012.
- [21] Jossen, A.; Weydanz, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. 36 Tabellen, 1. Auflage. Neusäß 2006.
- [22] Thielmann, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M.: Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe und Ottobrunn 2010.
- [23] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, 2. Auflage. Wiesbaden 2013.
- [24] Tschöke, H.: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. Wiesbaden 2015.
- [25] National Institute of Standards and Technology (NIST): The Role of the U.S National Innovation System in the Development of the PEM Stationary Fuel Cell. URL: <http://www.atp.nist.gov/eao/ir-7161/chapt2.htm>. Abrufdatum 26.05.2015.
- [26] Wietschel, M.; Bünger, U.: Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger. Endbericht. Karlsruhe und Ottobrunn 2010.
- [27] Doetsch, J.: Tankstellengeschichte zwischen Mythos und Wiederholungen. URL: <http://www.ed-info.de/edplus/ArtikelAnsichtArc.php?newsId=121>. Abrufdatum 18.05.2015.

- [28] Grube, M.: Tankstellengeschichte in Deutschland.
URL: <http://www.geschichtsspuren.de/artikel/verkehrsgeschichte/138-tankstellengeschichte.html>. Abrufdatum 18.05.2015.
- [29] Neumeier, S.: Modellierung der Erreichbarkeit von Straßentankstellen. Untersuchung zum regionalen Versorgungsgrad mit Dienstleistungen der Grundversorgung. Braunschweig 2012.
- [30] Mineralölwirtschaftsverband e. V. (M WV): Statistiken-Preise. Entwicklung des Tankstellenbestandes.
URL: <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise/?loc=14>. Abrufdatum 20.03.2016.
- [31] Radke, S. (Hrsg.): Verkehr in Zahlen. Hamburg 2014.
- [32] Scope Capital Services: Branchenstudie. Tankstellenmarkt Deutschland 2013/2014. Berlin 2014.
- [33] Deutscher Verband Flüssiggas e. V.: Autogas-Tankstellen.
URL: <http://www.autogastanken.de>. Abrufdatum 20.05.2015.
- [34] Neumann, R.: LPG & CNG Tankstellenverzeichnis. URL: <http://www.gas-tankstellen.de>. Abrufdatum 20.05.2015.
- [35] Wöber, B. M.: gibgas.de. Glossar.
URL: <http://www.gibgas.de/Blickpunkt/Glossar>. Abrufdatum 21.05.2015.
- [36] Der Tagesspiegel: Daimler und Linde bauen mehr Wasserstofftankstellen. Treibstoff der Zukunft. URL: <http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/treibstoff-der-zukunft-daimler-und-linde-bauen-mehr-wasserstoff-tankstellen/10810530.html>. Abrufdatum 21.05.2015.
- [37] TÜV SÜD: Weltweit 17 neue Wasserstoff-Tankstellen im Jahr 2014.
URL: <http://www.tuev-sued.de/tuev-sued-konzern/presse/pressearchiv/weltweit-17-neue-wasserstoff-tankstellen-im-jahr-2014>. Abrufdatum 21.05.2015.
- [38] Kley, F.: Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge. Entwicklung einer Ausbaustategie auf Basis des Fahrverhaltens. Stuttgart 2011.
- [39] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur. Berlin 2013.
- [40] Tesla Motors: Supercharger.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/supercharger. Abrufdatum 03.06.2015.
- [41] Kümmell, S.; Hillgärtner, M.: Inductive Charging Comfortable and Nonvisible Charging Stations for Urbanised Areas. In: Leal Filho, W.; Kotter, R. (Hrsg.): E-Mobility in Europe. Cham 2015.

- [42] Schraven, S.; Kley, F.; Wietschel, M.: Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 35 (2011) 3, S. 209–19.
- [43] Manager Magazin: Elektroautoprojekt Better Place gibt auf. Insolvenzantrag. URL: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/a-901960.html>. Abrufdatum 03.06.2015.
- [44] Das Blog zur nachhaltigen Mobilität: A better place: Batteriewechsel-Station für e-Taxis in Amsterdam. URL: <http://griin.de/serienreifes/a-better-place-batteriewechsel-station-fuer-e-taxis-in-amsterdam>. Abrufdatum 03.06.2015.
- [45] Tesla Motors: Battery Swap Event. Full Charge in 90 Seconds. URL: <http://www.teslamotors.com/videos/battery-swap-event>. Abrufdatum 03.06.2015.
- [46] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin 2014.
- [47] Wagner, M.; Hamacher, T.: Electromobility - Future Transport Solution for Suburban und Rural Areas? Vorgestellt auf EVTeC and APE Japan 2014. Yokohama 2014.
- [48] Biere, D.; Dallinger, D.; Wietschel, M.: Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 33 (2009) 2, S. 173–81.
- [49] Bozem, K.; Nagl, A.; Rath, V.; Haubrock, A.: Elektromobilität: Kundensicht, Strategien, Geschäftsmodelle. Wiesbaden 2013.
- [50] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW): BDEW-Erhebung Elektromobilität: Zuwachs bei öffentlichen Lademöglichkeiten. URL: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-erhebung-elektromobilitaet-zuwachs-bei-oeffentlichen-lademoeglichkeiten-de>. Abrufdatum 05.06.2015.
- [51] Umweltbundesamt (UBA): Umwelttrends in Deutschland. Daten zur Umwelt 2015. Dessau-Roßlau 2015.
- [52] Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2014. Bern 2014.
- [53] Le réseau de l'intelligence électrique: Power Generation by Energy Source. URL: <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/eco2mix-mix-energetique-en>. Abrufdatum 16.09.2015.
- [54] Gohla-Neudecker, B.: Analysis of Selected Sustainability Criteria of Electric Vehicles from an Energy-Economic Perspective in Europe, Dissertation. München 2014.

- [55] Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin 2009.
- [56] Krafftahrt-Bundesamt (KBA): Bestand an Pkw in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten.
URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z.html?nn=663524. Abrufdatum 06.06.2015.
- [57] Pontes, J.: EV Sales. Tracking down plug-in car sales all over the world.
URL: <http://ev-sales.blogspot.de/>. Abrufdatum 17.12.2014.
- [58] Shahan, Z.: ABB Conversations. Electric vehicle market share in 19 countries.
URL: <http://www.abb-conversations.com/2014/03/electric-vehicle-market-share-in-19-countries/>. Abrufdatum 16.12.2014.
- [59] Shahan, Z.: ABB Conversations. Top electric cars in 17 European countries (Charts). URL: <http://www.abb-conversations.com/2014/02/top-electric-cars-in-17-european-countries-charts/>. Abrufdatum 17.12.2014.
- [60] Bähr, J.: Einführung in die Urbanisierung, Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung. Berlin 2011.
- [61] Butler, R.: Cities in the world with more than 1 million inhabitants in 2005.
URL: http://www.mongabay.com/igapo/2005_world_city_populations/2005_city_population_01.html. Abrufdatum 16.06.2015.
- [62] United Nations (UN): World Urbansisation Projects. New York 2014.
- [63] Kraas, F.: Megacities. Our Global Urban Future. Dordrecht, London 2014.
- [64] Kagerbauer, M.: Mobilitätsverhalten - Entwicklungen und Trends, Vortrag am Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft und Studium Generale. Karlsruhe 2015.
- [65] Ritter, E.-H.: Handwörterbuch der Raumordnung, 4. Auflage. Hannover 2005.
- [66] Ministerkonferenz für Raumordnung: Raumordnungspolitischer Handlungsrahmen: Beschluss der Ministerkonferenz für Raumordnung in Düsseldorf am 8. März 1995. Bonn 1995.
- [67] Hoppe, T.: Der ländliche Raum im 21. Jahrhundert - Neubewertung einer unterschätzten Raumkategorie. Ein methodischer und regionaler Beitrag zur Kulturlandschaftsforschung und Raumplanung am Beispiel Schleswig-Holstein. Norderstedt 2010.
- [68] Hentschel, T.: Ländlicher Raum. Wie läuft's im ländlichen Raum.
URL: [http://www.laendlicher-raum.eu/index.php?content=Worum es geht](http://www.laendlicher-raum.eu/index.php?content=Worum%20es%20geht).
Abrufdatum 17.06.2015.
- [69] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): OECD Regions at a Glance 2013. Paris 2013.

- [70] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): OECD-Prüfbericht zur Politik für ländliche Räume Deutschland. Paris 2007.
- [71] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Die OECD in Zahlen und Fakten 2014. Wirtschaft, Umwelt, Gesellschaft. Paris 2014.
- [72] Haase, D.: Gemeinsame Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). Kurzdarstellungen über die Europäische Union.
URL: http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_5.1.6.pdf. Abrufdatum 22.03.2016.
- [73] European Commission (EC): Regions in the European Union. Nomenclature of territorial units for statistics: NUTS 2006/EU-27, Auflage 2007. Luxemburg 2007.
- [74] European Union (EU): Eurostat regional yearbook 2014. Luxemburg 2014.
- [75] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.: Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht: Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends. Bonn und Berlin 2010.
- [76] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Raumordnungsbericht 2011. Bonn 2012.
- [77] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Laufende Raumbeobachtungen - Raumabgrenzungen. Siedlungsstrukturelle Kreistypen.
URL: http://www.bbsr.bund.de/cIn_032/nn_1067638/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/Kreistypen4/kreistypen.html. Abrufdatum 14.06.2015.
- [78] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Laufende Raumbeobachtung - Raumabgrenzungen. Siedlungsstrukturelle Regionstypen.
URL: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Regionstypen/regionstypen.html>. Abrufdatum 14.06.2015.
- [79] Kirchmann, M.: Analyse des Mobilitätsverhaltens in unterschiedlichen Raumstrukturen und Abschätzung des Potentials für die Elektromobilität, Masterarbeit. München 2015.
- [80] Department of Statistics (DOS): Singapore Data and Statistics.
URL: <http://www.singstat.gov.sg/home>. Abrufdatum 18.06.2015.
- [81] Ministry of National Development (MND): A high Quality Living Environment for All Singaporeans. Land Use Plan to Support Singapore's Future Population. Singapur 2013.

- [82] The Worldbank: Data. Population.
URL: <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>. Abrufdatum 17.06.2015.
- [83] Ministry of Trade and Industry (MTI): Economic Survey of Singapore 2013. Singapur 2014.
- [84] Hafen Hamburg Marketing e. V.: Statistiken. Top Welt Containerhäfen.
URL: <http://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/toptwenty>. Abrufdatum 16.09.2015.
- [85] Department of Statistics (DOS); Ministry of Trade and Industry (MTI); Republic of Singapore: Yearbook of Statistics Singapore. Singapur 2015.
- [86] Land Transport Authority (LTA): Electronic Road Pricing (ERP).
URL: <http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/roads-and-motoring/managing-traffic-and-congestion/electronic-road-pricing-erp.html>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [87] Land Transport Authority (LTA): Certificate of Entitlement (COE).
URL: <http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/roads-and-motoring/owning-a-vehicle/vehicle-quota-system/certificate-of-entitlement-coe.html>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [88] Land Transport Authority (LTA): Public Transport.
URL: <http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/public-transport.html>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [89] Stadt Frankfurt: Statistisches Jahrbuch 2014. Frankfurt am Main 2014.
- [90] Hessisches Statistisches Landesamt: Statistik Hessen. Bevölkerung der hessischen Gemeinden. URL: <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/bevoelkerung-gebiet/regionaldaten/bevoelkerung-der-hessischen-gemeinden/index.html>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [91] Regionalverband FrankfurtRheinMain: Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main.
URL: <http://www.metropolregion-frankfurtrheinmain.de/>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [92] Loughborough University: The World According to GaWC 2012.
URL: <http://www.lboro.ac.uk/gawc/world2012t.html>. Abrufdatum 19.06.2015.
- [93] Frankfurt Airport: Daten und Fakten. URL: http://www.frankfurt-airport.de/content/frankfurt_airport/de/business_standort/daten_fakten.html. Abrufdatum 19.06.2015.
- [94] Stadt Ingolstadt: Statistisches Jahrbuch 2015. Ingolstadt 2015.

- [95] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (LfStaD): Statistik kommunal 2013. Eine Auswahl wichtiger statistischer Daten für die Kreisfreie Stadt Ingolstadt. München 2014.
- [96] Bayerisches Landesamt für Statistik: GENESIS-Online Datenbank. URL: <https://www.statistikdaten.bayern.de>. Abrufdatum 18.06.2015.
- [97] Markt Schöllnach: Ortsbeschreibung. URL: <http://www.schoellnach.de/?site=7>. Abrufdatum 22.06.2015.
- [98] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (LfStaD): Statistik kommunal 2013. Eine Auswahl wichtiger statistischer Daten für den Markt Schöllnach. München 2014.
- [99] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Gemeinden. Flensburg 2015.
- [100] Technische Universität München (TUM); Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE): Leitfa-den Energienutzungsplan. Teil I: Bestands- und Potentialanalyse. München 2010.
- [101] Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Eder, T.: Energienutzungsplan für die Stadt Ingolstadt. München 2014.
- [102] Loulou, R.; Labriet, M.: ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. In: Computational Management Science 5 (2008) 1-2, S. 7–40.
- [103] Loulou, R.; Remne, U.; Kanudia, A.; Lehtila, A.; Goldstein, G.: Documentation for the TIMES Model: PART I. Paris 2005.
- [104] Loulou, R.; Remne, U.; Kanudia, A.; Lehtila, A.; Goldstein, G.: Documentation for the TIMES Model: PART II. Paris 2005.
- [105] Wagner, M.; Hamacher, T.: The possible role of PV in the Singaporean power system. Vorgestellt auf PV Asia Pacific Conference 2011. Singapore 2011.
- [106] Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Hamacher, T.: Impacts of Photovoltaics and Electromobility on the Singaporean Energy Sector. In: Energy Procedia 25 (2012), S. 126–34.
- [107] Wagner, M.; Schönsteiner, K.; Hamacher, T.: Model-based analysis of Singapore's Energy System. In: Dincer, I.; Midilli, A.; Kucuk, H. (Hrsg.): Progress in Sustainable Energy Technologies Vol 1. Generating Renewable Energy. Cham 2014.
- [108] Wiesmeth, M.: Analyse und Modellierung des Potentials regenerativer Energien im Stadtgebiet von Ingolstadt, Diplomarbeit. München 2012.

- [109] LTA Academy; Land Transport Authority (LTA): JOURNEYS. Sharing Urban Transport Solutions. Singapur 2011.
- [110] Land Transport Authority (LTA): Singapore Land Transport Statistics in Brief 2015. Singapur 2015.
- [111] Asian Development Bank (ADB): Parking policy in Asian cities. Manila 2011.
- [112] Singapore Land Authority (SLA): Database Singapore Street Directory. Bereitgestellt über Technische Universität München. Singapur 2008.
- [113] Schönsteiner, K.: Modelling of the Present and Future Energy Sector in Singapore to Analyze the Integration of Electromobility, Diplomarbeit. München 2012.
- [114] Energy Market Authority (EMA): Singapore Energy Statistics 2014. Energising our Nation. Singapur 2014.
- [115] Energy Market Authority (EMA): Singapore Energy Statistics.
URL: http://www.ema.gov.sg/Singapore_Energy_Statistics.aspx. Abrufdatum 22.04.2015.
- [116] Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC): APEC Energy Overview 2010. Tokyo 2011.
- [117] U. S. Energy Information Administration: Singapore Crude Oil Imports by Source 2012. URL: <http://crudeoilpeak.info/sydneys-caltex-refinery-closed-as-chevrons-crude-production-and-sales-continue-to-decline>. Abrufdatum 04.05.2015.
- [118] Energy Market Authority (EMA): Statement of Opportunities for Electricity Industry 2007. Singapur 2007.
- [119] Energy Market Authority (EMA): Statement of Opportunities for the Singapore Energy Industry 2011. Singapur 2011.
- [120] Deutsch-Singapurische Industrie- und Handelskammer: Singapore - Renewable Energy Industry.
URL: http://www.sgc.org.sg/fileadmin/ahk_singapur/DEinternational/IR/diffIR/Renewable_Energies_Report_2014.pdf. Abrufdatum 23.04.2015.
- [121] Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS); Energy Research Institute @ NTU (ERI@N); Institute of Materials Research and Engineering (IMRE): Solar Energy Technology Primer: A Summary.
URL: <https://www.nccs.gov.sg/sites/nccs/files/Solar%20Primer%20%28revised%29.pdf>. Abrufdatum 23.03.2016.
- [122] World Nuclear News: Nuclear not currently an Option for Singapore.
URL: <http://www.world-nuclear-news.org/np->

- nuclear_not_currently_an_option_for_singapore-1104131.html. Abrufdatum 04.05.2015.
- [123] Land Transport Authority (LTA): LTMMASTERPLAN. Singapur 2008.
- [124] Reuter, B.; Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Gleyzes, D.; Massier, T.; Hamacher, T.; Lienkamp, M.: Life cycle greenhouse gas analysis for automotive applications - A case study for taxis in Singapore. In: International Journal of Smart Grid and Clean Energy 3 (2014) 2, S. 127–34.
- [125] Regionalverband FrankfurtRheinMain: Mobilitätskennziffern für die Region Frankfurt/Rhein-Main und ihre Kommunen. Daten für eine integrierte Planung. Frankfurt am Main 2014.
- [126] NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH: Datensatz Gebäude Frankfurt am Main (2012-2014). Frankfurt am Main.
- [127] Statistisches Bundesamt (Destatis): 66 Prozent der Erwerbstätigen fahren mit dem Auto zur Arbeit.
URL: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2013/PD13_048_p002pdf.pdf?__blob=publicationFile. Abrufdatum 03.08.2015.
- [128] Mainova AG: Stromkennzeichnung. URL: https://www.mainova.de/static/de-mainova/downloads/Stromkennzeichen_2014.pdf. Abrufdatum 26.08.2015.
- [129] Solarbundesliga: Daten zu installierten Leistungen.
URL: <http://www.solarbundesliga.de>. Abrufdatum 27.08.2015.
- [130] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Effizienzhaus Plus.
URL: <http://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/>. Abrufdatum 18.09.2015.
- [131] Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Dierkes, S.; Münch, K.; Hans, M.; Fiedeldey, M.; Hamacher, T.; Moser, A.: Veränderte Anforderungen an städtische Energieinfrastrukturen durch die Energiewende am Beispiel Frankfurt am Main. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64 (2014) 10, S. 75–78.
- [132] Münch, K.; Dierkes, S.; Schönsteiner, K.; Wagner, M.; Neubauer, F.; Bader, A.; Hans, M.: Spartenübergreifende Ermittlung langfristiger kostenoptimaler Zielnetzstrukturen (Strom, Gas und Fernwärme) im Stadtgebiet Frankfurt am Main. In: Moser, A. (Hrsg.): Jahresbericht 2014. Aachener Beiträge zur Energieversorgung. Aachen 2014.
- [133] Inovaplan GmbH: Umweltverbund: Öffentlicher Verkehr, Rad- und Fußverkehr, Vortrag Bürgerwerkstatt Ingolstadt. Ingolstadt 2013.

-
- [134] Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: Digitale Geodaten. Bereitgestellt über Technische Universität München. München 2012-2015.
- [135] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (StMWI): Energie-Atlas Bayern.
URL: <http://www.energieatlas.bayern.de/>. Abrufdatum 28.08.2015.
- [136] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (DGS): Energy Map.
URL: <http://www.energymap.info>. Abrufdatum 28.08.2015.
- [137] Schardinger, I.: Räumliche Modellierung und Optimierung regionaler Energiesysteme, Dissertation. Salzburg 2014.
- [138] Funke, S. Á.; Gnann, T.; Plötz, P.: Addressing the Different Needs for Charging Infrastructure: An Analysis of Some Criteria for Charging Infrastructure Set-up. In: Leal Filho, W.; Kotter, R. (Hrsg.): E-Mobility in Europe. Cham 2015.
- [139] Thoma, Y.: Technological and economic matching of electric vehicles' charging concepts to different use cases in the context of Singapore, Diplomarbeit. München 2014.
- [140] Geuß, M.: Development of Business Models for an Electric Vehicle Charging System in Singaporean Car Parks, Diplomarbeit. München 2012.
- [141] Huber, M.; Trippe, A.; Kuhn, P.; Hamacher, T.: Effects of large scale EV and PV integration on power supply systems in the context of Singapore: 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe).