

Abschätzung der Klimawirkung von Parkraum-Management in Baden-Württemberg

Dokumentation der Ergebnisse der Kurzstudie
„Klimafreundliches Parkraum-Management“

Arbeitspapier

Karlsruhe 30.11.2023

Ansprechpartner:

Dr. Wolfgang Schade

Tel: +49 721 824 818 90

Fax: Tel: +49 721 824 818 91

wolfgang.schade@m-five.de

**M-Five GmbH Mobility, Futures,
Innovation, Economics**

Bahnhofstr. 46, 76137 Karlsruhe

<http://www.m-five.de>

Autor*innen des Arbeitspapiers:

M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation,
Economics (M-Five)

Dr. Wolfgang Schade

Ines Haug

Daniel Berthold

PTV Transport Consult GmbH (PTV)

Dr. Volker Waßmuth

Nadine Köllermeier

**Vorgeschlagene Zitierweise des
Arbeitspapiers:**

Schade W., Haug I., Berthold D., Waßmuth V.,
Köllermeier N. (2023): *Abschätzung der
Klimawirkung von Parkraum-Management in
Baden-Württemberg*. Arbeitspapier im Auftrag der
NVBW Nahverkehrsgesellschaft, Stuttgart.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Einleitung und Untersuchungsgegenstand.....	7
3	Wissenschaftliche Grundlagen und Methodik	7
3.1	Inputparameter I: Zeitänderung je Pkw-Fahrt.....	9
3.2	Inputparameter II: Kostenänderung je Pkw-Fahrt.....	17
3.3	Inputparameter III: Elastizität der Kostenänderung	18
3.4	Inputparameter IV: Parkplatz zu Pkw Verhältnis	20
4	Ergebnisse.....	21
4.1	Wirkung auf die Verlagerung von Pkw-Verkehr.....	21
4.2	Wirkung auf die Verringerung der Pkw-Flotte.....	27
4.3	Klimaschutzwirkung	30
4.4	Ausblick und weitere Forschungsfragen.....	31
5	Anhang: Beschreibung der ASTRA-Modellierung	33
5.1	Das 4-Stufen Verkehrsmodell	33
5.2	Die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr.....	35
5.3	Die Modellierung des Pkw-Bestands.....	38
6	Referenzen	43

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Vier untersuchte Wirkungsströme	8
Abbildung 2	Überblick Netzmodell Validate	10
Abbildung 3	Netzausschnitt PTV Validate mit Bezirksgrenzen (weiß) und Anbindungen (türkis)	11
Abbildung 4	Aufteilung der Nutzungsgruppen.....	13
Abbildung 5	Zunahme der Widerstände je Nutzungsgruppe und Szenario	14
Abbildung 6	Änderung der Nutzungsgruppen in den Szenarien 2 und 3 gegenüber dem Ausgangszustand bzw. Szenario 1	16
Abbildung 7	Reisezeitänderungen der Szenarien in ASTRA-Bezirksstruktur basierend auf Regierungsbezirken	17
Abbildung 8	Parkkosten der drei Szenarien.....	17
Abbildung 9	Kostenänderungen der Szenarien in ASTRA-Bezirksstruktur basierend auf Regierungsbezirken.....	18
Abbildung 10	Übersicht zu Elastizitäten in der internationalen Literatur	19
Abbildung 11	Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, im Referenzszenario	22
Abbildung 12	Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, im Referenzszenario	22
Abbildung 13	Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Erhöhung der Parkgebühren	23
Abbildung 14	Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Erhöhung der Parkgebühren	23
Abbildung 15	Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Reduktion der Parkplätze	24
Abbildung 16	Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Reduktion der Parkplätze	24
Abbildung 17	Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Einführung beider Maßnahmen	25
Abbildung 18	Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Einführung beider Maßnahmen	25
Abbildung 19	Modalwahl für BW, aggregiert, nach Einführung beider Maßnahmen.....	26
Abbildung 20	Pkw Bestand in BW, nach Erhöhung der Parkgebühren	27
Abbildung 21	Pkw Bestand in BW, nach Reduktion der Parkplätze	28

Abbildung 22	Pkw Bestand in BW, nach Einführung beider Maßnahmen	29
Abbildung 23	THG-Minderung durch klimafreundliches Parkraum-Management	30
Abbildung 24	Überblick über das System-Modell ASTRA	33
Abbildung 25	Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA	35
Abbildung 26	Distanzklassen und Verkehrsmittel in ASTRA	36
Abbildung 27	Treiber, Modellstufen und Entscheidungsfunktionen des Pkw-Kaufmodells	40
Abbildung 28	Aufbau des Pkw-Bestand-Modells in ASTRA mit 25 Alterskohorten	41
Abbildung 29	Verteilung der Antriebsarten im Referenzszenario	42
Abbildung 30	Verteilung der Antriebsarten im Szenario mit Klimaschutz	42

1 Zusammenfassung

Parkraumbewirtschaftung ist als Maßnahme für den Klimaschutz im Verkehr bislang nur wenig beachtet. In dieser Kurzstudie wurde die Klimawirkung von zwei Kernmaßnahmen der Parkraumbewirtschaftung untersucht und bewertet. Die beiden Maßnahmen sind:

- Marktorientierte Erhöhung der Parkgebühren (differenziert nach Kurzzeit- und Bewohnerparken).
- Bündelung und Reduktion von Parkplätzen mit Erhöhung der Such-, Zu- und Abgangszeiten.

Für beide Maßnahmen werden drei verschiedene Szenarien analysiert, in denen die jeweilige Ambition der Ausgestaltung ansteigt. Abschließend wird immer auch eine Kombination der beiden Maßnahmen betrachtet. Einen Überblick über die zukünftigen Parkgebühren in den drei Szenarien gibt die nachfolgende Tabelle:

Parkkosten in Szenarien	Kurzzeitparken		Anwohnerparken
	€ pro Stunde	€ pro Tag	€ pro Jahr
Szenario 1	1	10	140
Szenario 2	2	15	500
Szenario 3	4	30	1 000

Beide Maßnahmen verringern die Attraktivität der Pkw-Nutzung und führen somit zu einer Verlagerung der Wege auf andere Verkehrsmittel wie Zug, Bus, Fahrrad, Sharing- und Pooling-Angebote, und auf kurzen Strecken auf den Fußverkehr. Zusätzlich werden Entscheidungen zum Pkw-Besitz (bspw. die Anschaffung eines Zweitwagens oder die Abschaffung eines älteren Fahrzeugs) vor allem in mit Alternativen ausreichend ausgestatteten Gebieten anders getroffen, so dass die Pkw-Flotte mit der Zeit ebenfalls zurückgeht.

Die Verlagerung wirkt sich auf verschiedenen Fahrdistanzen unterschiedlich aus. Die Szenarien spannen dabei für verschiedene Distanzen einen weiten Fächer an Verlagerungen zwischen einstelligen Prozentwerten und der Hälfte der Pkw-Fahrten auf. Sehr kurze Pkw-Fahrten unter 2 km verschwinden bei einer ambitionierten Ausgestaltung der jeweiligen Maßnahme in der Stadt sogar fast vollständig. Die Spannbreite der Wirkung auf den Pkw-Besitz liegt insgesamt zwischen einer Reduktion der Pkw-Flotte um 50 000 Pkw und um 810 000 PKW in der langen Frist in Baden-Württemberg.

Die Treibhausgasminderung aus dem Pkw-Verkehr in Baden-Württemberg erreicht pro Jahr bei einer gemeinsamen Einführung beider Maßnahmen in Szenario 1 über 0,3 Mt CO_{2äq.}, in Szenario 2 etwa 0,7 Mt CO_{2äq.}, und in Szenario 3 bis zu 1,3 Mt CO_{2äq.}. Letzteres entspricht etwa 6 Prozent der heutigen Emissionen an Treibhausgasen aus dem Verkehr in Baden-Württemberg. Nur bezogen auf den PKW-Verkehr wären es in der ambitioniertesten Ausgestaltung ein Zehntel seiner heutigen THG-Emission. Dahinter steht eine flächendeckende Einführung der Maßnahmen, jedoch in einem regional differenzierten und an lokale Gegebenheiten angepassten Rahmen.

2 Einleitung und Untersuchungsgegenstand

Diese Dokumentation basiert auf den Arbeiten im Rahmen der Kurzstudie „Klimafreundliches Parkraum-Management“, die von M-Five und PTV im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg bearbeitet wurde. Dabei wurde die Wirkung eines ambitionierten, klimafreundlichen Parkraum-Managements auf (1) die Verlagerung von Pkw-Verkehr und (2) die Verringerung der Pkw-Flotte ermittelt, sowie (3) deren Klimaschutzwirkung abgeleitet. Unter Verlagerung wird die Wahl eines alternativen Verkehrsmittels zum Pkw verstanden und die Pkw-Nutzung adressiert. Unter Verringerung wird die Abschaffung bzw. der nicht erneute Kauf eines Pkw verstanden und der Pkw-Besitz adressiert. Unter dem Begriff Parkraum-Management wurde eine Erhöhung der Parkgebühren (differenziert nach Kurzzeit- und Bewohnerparken) und eine Erhöhung der Zu- und Abgangszeiten (bspw. durch Reduktion der Anzahl an verfügbaren Parkplätzen) untersucht. Das Ziel dieser Dokumentation ist eine Verschriftlichung der Grundlagen, der Methodik und der Ergebnisse, um ein detailliertes Verständnis der Kurzstudie und der erzielten Erkenntnisse zu ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf einer Verdeutlichung der Wirkungszusammenhänge von Parkgebühren, Parkplätzen und Klimaschutz.

Kosten und Zeiten sind entscheidende Einflussfaktoren bei der Wahl eines Verkehrsmittels. Eine Erhöhung dieser beiden Faktoren für den Pkw, bspw. durch erhöhte Parkgebühren oder erhöhte Zugangs- und Abgangszeiten sowie Parksuchzeiten aufgrund verknappter Parkplätze, reduziert die Attraktivität der Pkw-Nutzung im Verhältnis zu weiteren zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln, wie Zug, Bus, Fahrrad, Fuß oder Sharing- und Pooling-Angebote. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit für die Wahl des Pkw für eine Fahrt. Eine Reduktion der Pkw-Fahrten führt zu einer direkten Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr. Weitere positive Effekte wie die Reduktion von Stickoxiden, Feinstaub und Lärmbelastung werden in dieser Kurzstudie nicht berücksichtigt.

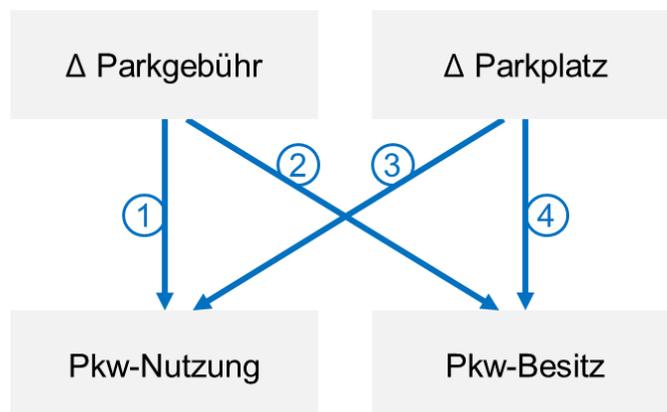
Ein Anstieg der Kosten und (Zugangs-)Zeiten reduziert auch die Attraktivität des Pkw-Besitzes. Während variable Kosten (bspw. Stunden- oder Tagesparkgebühren am Zielort) durch die Wahl eines alternativen Verkehrsmittels vermieden werden können, fallen fixe Kosten (bspw. jährliche Bewohnerparkgebühren) bereits durch den reinen Pkw-Besitz an. Dieser verursacht per se keine Emissionen im Verkehr. Aufgrund der knappen Verfügbarkeit an öffentlichem Raum, sowie der hohen Kosten von Parkraum (siehe auch ifeu 2022) weist aber auch eine Reduktion der Pkw-Flotte positive Effekte auf. Da der Pkw-Besitz die Pkw-Nutzung meist attraktiver erscheinen lässt bzw. oft auch einen Abwägungsprozess über alternative Verkehrsmittel verhindert, ist zur Erreichung der Klimaziele ein Ansetzen an beiden Hebeln sinnvoll.

3 Wissenschaftliche Grundlagen und Methodik

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche zu den Effekten eines klimafreundlichen Parkraum-Managements auf die Pkw-Nutzung und den Pkw-Besitz durchgeführt. Zu diesem Themengebiet wurden bisher nur wenige Studien veröffentlicht,

weshalb dabei auch auf internationale Literatur zurückgegriffen wurde. Diese ist aufgrund unterschiedlicher regionaler Gegebenheiten und Gewohnheiten jedoch nur begrenzt auf die Fragestellung in Deutschland bzw. Baden-Württemberg anwendbar. Zusätzlich wurde auch Literatur, die den generellen Zusammenhang zwischen Kosten und Pkw-Nutzung und -Besitz untersucht, berücksichtigt, um einen möglichst breiten und fundierten Literaturüberblick zu erhalten. Während die Datenverfügbarkeit zur Höhe der Parkgebühren (differenziert nach Stunde, Tag und Jahr) hoch ist, gibt es zur Anzahl an Parkplätzen (differenziert nach freier Straßenrand, Straßenparkstand, öffentliche Parkhäuser und private Parkplätze) lediglich einzelne grobe Schätzungen. An dieser Stelle würde eine Verbesserung der Datenbasis und eine flächendeckende Bereitstellung der Daten zur Anzahl an Parkplätzen nach Nutzungstyp detailliertere Untersuchungen ermöglichen.

Die Wahl der angewandten Methodik ist abhängig von den betrachteten Einflussfaktoren und der spezifischen Fragestellung, so dass sich für die Folgenabschätzung insgesamt vier untersuchte Wirkungsströme ergeben, siehe Abbildung 1. Die Wirkung der Änderung von Parkgebühren auf die Pkw-Nutzung (1) und auf den Pkw-Besitz (2), und die Wirkung der Änderung von Parkplätzen auf die Pkw-Nutzung (3) und auf den Pkw-Besitz (4).



Quelle: M-Five.

Abbildung 1 Vier untersuchte Wirkungsströme

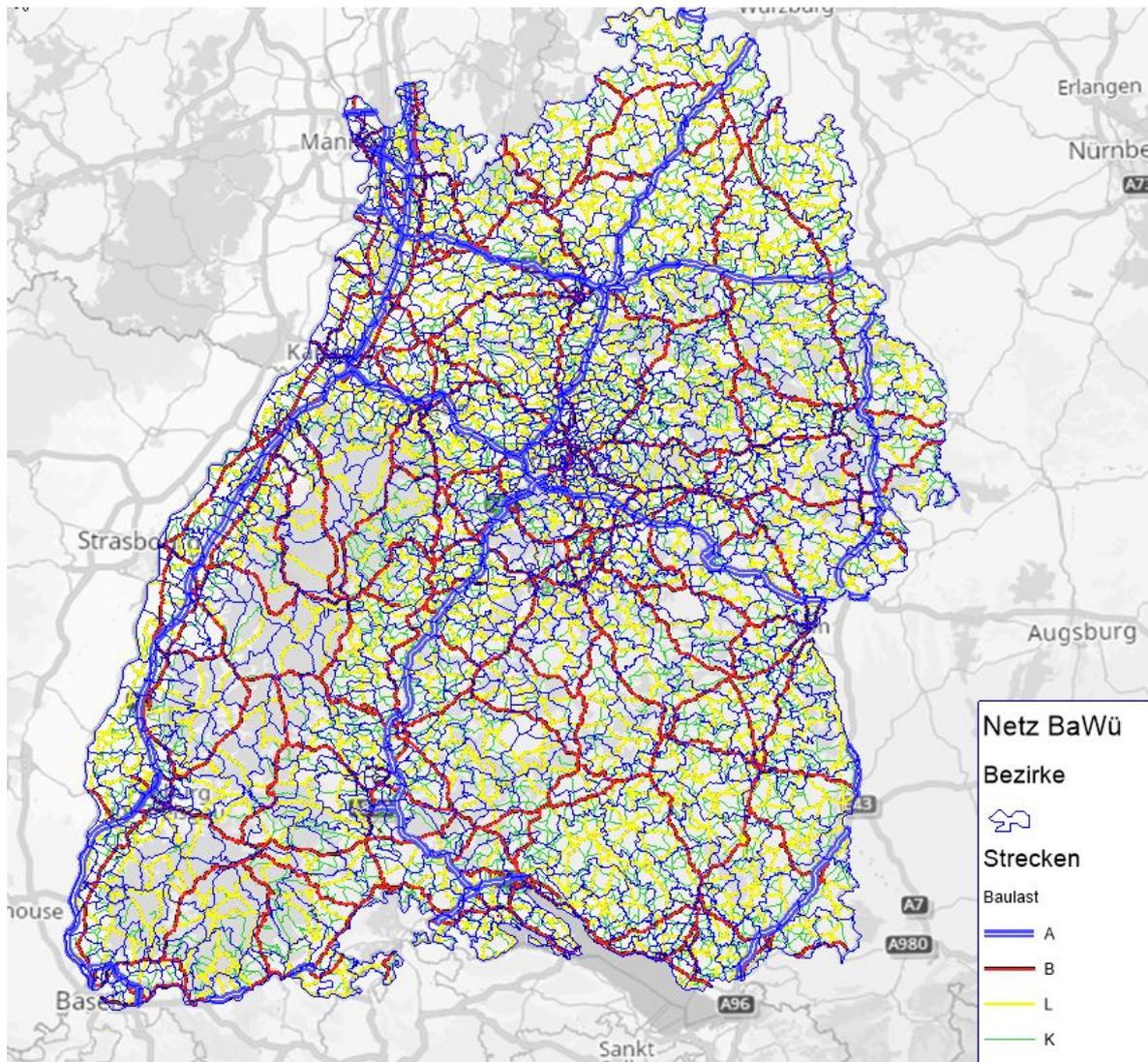
Die Wirkungsströme 1 und 3 lassen sich mit Hilfe des Verkehrssystemmodell ASTRA von M-Five modellieren. Das Modell bildet die Verkehrsnachfrage für den Personenverkehr ab, und berechnet anhand des 4-Stufen-Ansatzes der Verkehrsmodellierung die Wahl des Verkehrsmittels je Fahrt. Dies ist über diskrete Wahlentscheidungen mittels Logit Funktionen implementiert. Verkehrsmittelspezifische Faktoren, insbesondere Kosten und Zeiten je Fahrt, werden bei der Verkehrsmittelwahl berücksichtigt und können modellseitig variiert werden. Eine detailliertere Modellbeschreibung für den Personenverkehr befindet sich im Anhang, sowie darüberhinausgehend in Schade et al. (2022).

Die Wirkungsströme 2 und 4 lassen sich nicht ohne Weiteres in ASTRA modellieren, da die Pkw-Kaufentscheidung durch makroökonomische Größen, wie dem Bevölkerungsniveau, dem Einkommen und regionalen Strukturen getrieben wird. Es besteht in der Verkehrserzeugung nach Fahrtzwecken in ASTRA keine Rückkopplung zwischen der Häufigkeit der Pkw-Nutzung und des Pkw-Besitzes. Zur Abschätzung der Wirkung auf den Pkw-Besitz werden daher in dieser Kurzstudie ergänzende Modelle erstellt, die aus der Literatur und verfügbaren Daten abgeleitet und berechnet werden können. Sie werden in Unterkapitel 3.3 und 3.4 näher erläutert.

Für alle quantitativen Analysen der Szenarien zum klimafreundlichen Parkraum-Management ist ein Zusammenspiel aus der strategischen Ebene durch ASTRA und der differenzierten Netzbetrachtung durch PTV Validate erforderlich. PTV Validate bildet das Straßenverkehrsgeschehen mit kleinräumigem Netzbezug sehr detailliert ab, während ASTRA auf einem höheren Aggregationslevel die gesamt- und einzelwirtschaftlichen Zusammenhänge, die Verkehrsnachfrageentscheidung und die Flottenentwicklung berücksichtigt. Die verwendeten Inputparameter der vier untersuchten Wirkungsströme werden in den folgenden Unterkapiteln genauer dargestellt und die dahinterliegenden Annahmen erläutert.

3.1 Inputparameter I: Zeitänderung je Pkw-Fahrt

Zur Modellierung der Widerstandseffekte wurde ein Modellausschnitt für Baden-Württemberg der deutschlandweiten Verkehrsdatenplattform PTV Validate verwendet. Abbildung 2 zeigt einen Überblick über das darin enthaltene Netzmodell.



Quelle: PTV Validate.

Abbildung 2 Überblick Netzmodell Validate

Dieses Netzmodell bildet das klassifizierte Straßennetz und alle Gemeindestraßen mit Verbindungsfunktion ab. Wie in jedem netzorientierten Verkehrsnachfragemodell wird das Verkehrsaufkommen auf der Basis von Verkehrsbezirken berechnet und dann über sogenannte Anbindungen mit dem Straßennetz verbunden. Methodische Hintergründe zu PTV Validate sind u.a. in Friedrich et al. (2023) und Vortisch, Waßmuth (2007) beschrieben. Für Baden-Württemberg ist die Verkehrsnachfrage in ca. 1.300 Bezirken differenziert. Die folgende Abbildung zeigt für einen Ausschnitt aus Stuttgart die Verkehrsbezirke und die jeweiligen Anbindungen (für eine gleichmäßige Verteilung der Nachfrage wird ein Bezirk mit mehreren Anbindungen an das Straßennetz angebunden).



Quelle: PTV Validate.

Abbildung 3 Netzausschnitt PTV Validate mit Bezirksgrenzen (weiß) und Anbindungen (türkis)

Die Modellauflösung von Validate ist wegen der deutschlandweiten Abbildung gröber als in einem kommunalen Modell; für die hier durchzuführende überschlägige Betrachtung ist die Auflösung aber ausreichend. Für die Abbildung des Parkverkehrs kommt den Anbindungen eine entscheidende Bedeutung zu. Für jede Anbindung wird eine Anbindungszeit gesetzt, die in die Widerstandsberechnung einer Relation von Quellbezirk zu Zielbezirk einfließt. Die Anbindungszeit repräsentiert die Zugangszeit zum Pkw, die Verbindungszeit im untergeordneten Netz sowie Abgangs- bzw. Parksuchzeiten. Durch eine Veränderung dieser Anbindungszeiten können die einzelnen Szenarien abgebildet werden. So führt z.B. erhöhter Parkdruck zu einer erhöhten Parksuchzeit sowie Zu- und Abgangszeit, eine Quartiersgarage reduziert zwar unter Umständen die Parksuchzeit, erhöht aber die Zu- und Abgangszeit. Durch die Abbildung der Szenarien in Validate werden unter Kenntnis der Gesamtnachfrage im Modell und Informationen darüber, welcher Anteil der Verkehrsnachfrage mit welcher Anbindungszeit belegt ist, Zu- und Abgangswiderstände je Szenario ermittelt.

Analysen der Effekte von Parkraumbewirtschaftungen müssen verschiedene Nutzergruppen unterscheiden, da im öffentlichen Raum (Kurzzeitparkende, Tagesparkende oder Dauerparkende), in öffentlichen Parkhäusern oder auf Privatgrundstücken unterschiedliche Grundlagen bestehen. So entziehen sich beispielsweise Stellplätze auf Privatgrundstücken weitgehend einer Parkraumbewirtschaftung – demnach sind die Effekte eines Parkraummanagements in Gebieten mit einem hohen Anteil an Stellplätzen auf Privatgrundstücken deutlich geringer als in Gebieten mit Stellplätzen überwiegend im öffentlichen Raum.

Zur besseren Differenzierung wurden die folgenden Nutzungsgruppen unterschieden:

- Parken im öffentlichen Raum, davon
 - Kurzzeitparkende
 - Tagesparkende
 - Dauerparkende / Anwohner
- freier Straßenrand
- Parken in öffentlichen Parkhäusern
- Parken privat.

Für die regionale und räumliche Differenzierung wird die sogenannte Regio-Star-7-Differenzierung in sieben Klassen verwendet:

- 71 Metropolen
- 72 Regiopolen und Großstädte
- 73 Mittelstädte, städtischer Raum einer Stadtregion
- 74 Kleinstädtischer dörflicher Raum einer Stadtregion
- 75 Zentrale Städte einer Ländlichen Region
- 76 Mittelstädte, städtischer Raum
- 77 Kleinstädtischer, dörflicher Raum einer Ländlichen Region

Die die Landkreise und kreisfreien Städte jeweils einem Regio-Star-7-Typ zugeordnet sind, kann eine Zuordnung zum Validate-Verkehrsmodell erfolgen.

Für die Differenzierung der Nutzungsgruppen in der Ausgangssituation wurden in einem vorgelagerten Schritt regionstypspezifische Anteile aus der Erhebung „Mobilität in Deutschland (MiD) 2017“ abgeleitet. Für die Differenzierung der Kategorie „Parken im ländlichen Raum“ wurden vorliegende lokale Erhebungen, die Analysen der Ifeu Studie „Kosten von Parkraum“ 2022 (ifeu 2022) und eigene Abschätzungen aus Analogie-Schlüssen verwendet. Die Differenzierung der Nutzungsgruppen erfolgt getrennt für Quelle und Ziel der einzelnen Wege (vgl. Abbildung 4), damit werden die Auswirkung von unterschiedlichen Ausgangssituationen (z.B. privater Stellplatz am Wohnort, gebührenpflichtiger Stellplatz am Arbeitsort) berücksichtigt.

QUELLE	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	50%	30%	22%	13%	25%	22%	13%
<i>davon</i> Kurzzeitparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tagesparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dauerparkende / Anwohner	15%	10%	5%	5%	5%	0%	0%
freier Straßenrand	37%	22%	20%	8%	22%	23%	14%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	12%	11%	8%	5%	13%	4%	4%
Parken privat	36%	57%	67%	82%	60%	73%	82%

ZIEL	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	50%	30%	22%	13%	25%	22%	13%
<i>davon</i> Kurzzeitparkende	5%	5%	5%	3%	3%	1%	1%
Tagesparkende	3%	3%	3%	3%	3%	2%	2%
Dauerparkende / Anwohner	15%	10%	5%	5%	0%	0%	0%
freier Straßenrand	29%	14%	12%	5%	21%	22%	13%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	12%	11%	8%	3%	13%	2%	2%
Parken privat	36%	57%	67%	82%	60%	73%	82%

Quelle: PTV, eigene Berechnungen.

Abbildung 4 Aufteilung der Nutzungsgruppen

Aus dem Netzmodell von PTV Validate liegt für jede Relation zwischen den 1.300 Verkehrsbezirken in Baden-Württemberg die Information über die mittlere tägliche Reisezeit $t_{RZ,i,j}$ vor

$$t_{RZ,i,j} = t_{ZZ,i} + t_{Fz,i,j} + t_{AZ,j}$$

mit

$t_{RZ,i,j}$ = mittlere Reisezeit von Quelle i zum Ziel j

$t_{ZZ,i}$ = Zugangszeit an der Quelle i

$t_{Fz,i,j}$ = modellierte Fahrzeit im Fahrzeug von der Quelle i zum Ziel j

$t_{AZ,j}$ = Abgangszeit am Ziel j

Es wird davon ausgegangen, dass die modellierte Fahrzeit im Fahrzeug von der Parkraumbewirtschaftung nicht beeinflusst ist, somit können die Änderungen in den Szenarien durch Anpassung der Zu- und Abgangszeiten abgebildet werden. Für die drei Szenarien wurden folgende zusätzlichen Widerstände je Nutzungsgruppe angesetzt:

Szenario 1							
Widerstand (Minuten)	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum							
davon Kurzzeitparkende	10	10	8	8	8	3	3
Tagesparkende	10	10	8	8	8	3	3
Dauerparkende / Anwohner	8	8	8	5	5	3	3
freier Straßenrand	10	10	8	8	8	3	3
Parken in öffentlichen Parkhäusern	5	5	5	5	5	5	5
Parken privat	1	1	1	1	1	1	1
Szenario 2							
Widerstand (Minuten)	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum							
davon Kurzzeitparkende	13	13	11	11	11	7	7
Tagesparkende	13	13	11	11	11	7	7
Dauerparkende / Anwohner	11	11	11	8	8	7	7
freier Straßenrand	13	13	11	11	11	7	7
Parken in öffentlichen Parkhäusern	6	6	6	6	6	6	6
Parken privat	2	2	2	2	2	2	2
Szenario 3							
Widerstand (Minuten)	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum							
davon Kurzzeitparkende	16	16	14	14	13	10	10
Tagesparkende	16	16	14	14	13	10	10
Dauerparkende / Anwohner	13	13	14	10	11	10	10
freier Straßenrand	18	18	16	15	13	11	11
Parken in öffentlichen Parkhäusern	7	7	7	7	7	7	7
Parken privat	3	3	3	3	3	3	3

Quelle: PTV, eigene Berechnungen.

Abbildung 5 Zunahme der Widerstände je Nutzungsgruppe und Szenario

Über die Anteile der Nutzungsgruppe je Regionstyp können mittlere Zu- und Abgangswiderstände für jede Relation ermittelt werden.

$$t_{ZZ,R} = \sum_{NG} t_{ZZ,NG,R} * p_{NG,R}$$

Mit

$t_{ZZ,R}$ = Zugangszeit an der Quelle in der Raumkategorie R

$t_{ZZ,NG,R}$ = Zugangszeit der Nutzungsgruppe NG in der Raumkategorie R

$p_{NG,R}$ = Anteil der Nutzungsgruppe NG in der Raumkategorie R

bzw.

$$t_{AZ,R} = \sum_{NG} t_{AZ,NG,R} * p_{NG,R}$$

Mit

$t_{AZ,R}$ = Abgangszeit an der Quelle in der Raumkategorie R

$t_{AZ,NG,R}$ = Abgangsszeit der Nutzungsgruppe NG in der Raumkategorie R

$p_{NG,R}$ = Anteil der Nutzungsgruppe NG in der Raumkategorie R

PTV Validate enthält neben den Reisezeitinformationen auch Informationen über die Verkehrsnachfrage, u.a. für den Pkw-Verkehr, differenziert in Ortsveränderungsmatrix mit 1.300×1.300 Einträgen. Somit können die feinräumigen Informationen über 1,69 Mio. Relationen in Baden-Württemberg mit den Nachfragedaten gewichtet auf die für ASTRA erforderliche Einheit NUTS2 (Regierungsbezirke) mit der zusätzlichen Unterteilung in „städtisch“ und „ländlich“ aggregiert werden.

$$t_{RZ,I,J,R} = \frac{\sum_j^J \sum_i^I (t_{RZ,i,j,R} * D_{i,j,R})}{D_{I,J,R}}$$

Mit

$t_{RZ,I,J,R}$ = mittlere Reisezeit von RegB I nach RegB J in Regiotyp R

$t_{RZ,i,j,R}$ = Reisezeit von Feinbezirk i nach Feinbezirk j in Regiotyp R

$D_{i,j,R}$ = Verkehrsnachfrage im Pkw – Verkehr von Feinbezirk i nach Feinbezirk j

$D_{I,J,R}$ = Verkehrsnachfrage im Pkw – Verkehr von RegB I nach RegB J

Durch ein Parkraummanagement ändern sich nicht nur die Widerstände im Zu und Abgang, sondern auch die Verteilung der Nutzungsgruppen aus Abbildung 4, in dem sich der Anteil der Straßenraumparkenden reduziert. Für die weitere Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Nutzungsgruppen in Szenario 1 der Ausgangssituation entspricht, während sich durch das Parkraummanagement, insbesondere durch die Reduktion der Stellplätze am Straßenrand, in den Szenarien 2 und 3 die folgenden Änderungen der Nutzungsgruppen ergeben.

Szenario 2							
QUELLE	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	45%	25%	17%	13%	21%	17%	12%
davon Kurzzeitparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tagesparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dauerparkende / Anwohner	25%	14%	8%	5%	8%	5%	0%
freier Straßenrand	22%	13%	12%	8%	15%	13%	13%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	15%	14%	11%	5%	15%	7%	5%
Parken privat	39%	60%	70%	82%	62%	76%	83%
ZIEL	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	45%	25%	17%	13%	21%	17%	12%
davon Kurzzeitparkende	5%	5%	5%	3%	3%	1%	1%
Tagesparkende	3%	3%	3%	3%	3%	2%	2%
Dauerparkende / Anwohner	25%	12%	8%	5%	8%	5%	0%
freier Straßenrand	14%	7%	4%	2%	9%	10%	10%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	15%	14%	11%	5%	15%	7%	5%
Parken privat	39%	60%	70%	82%	62%	76%	83%

Szenario 3							
QUELLE	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	40%	20%	12%	13%	17%	12%	10%
davon Kurzzeitparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tagesparkende	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dauerparkende / Anwohner	35%	18%	11%	5%	11%	8%	0%
freier Straßenrand	7%	4%	4%	8%	8%	5%	11%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	17%	16%	13%	5%	17%	9%	6%
Parken privat	41%	62%	72%	82%	64%	78%	84%
ZIEL	Stadt - Metropole	Stadt - Regiopole und Großstadt	Stadt - Mittelstadt, städtischer	Stadt - kleinstädtischer, dörflicher	ländliche - zentrale Stadt	ländliche - Mittelstadt, städtischer	ländliche - kleinstädtischer, dörflicher
Parken im öffentlichen Raum	40%	20%	12%	13%	17%	12%	10%
davon Kurzzeitparkende	5%	4%	5%	3%	3%	1%	1%
Tagesparkende	2%	1%	1%	1%	2%	1%	1%
Dauerparkende / Anwohner	32%	14%	8%	6%	11%	8%	3%
freier Straßenrand	3%	3%	1%	3%	3%	3%	6%
Parken in öffentlichen Parkhäusern	17%	16%	13%	5%	17%	9%	6%
Parken privat	41%	62%	72%	82%	64%	78%	84%

Quelle: PTV, eigene Berechnungen.

Abbildung 6 Änderung der Nutzungsgruppen in den Szenarien 2 und 3 gegenüber dem Ausgangszustand bzw. Szenario 1

Aus diesen Berechnungen können die folgenden mittleren Reisezeitänderungen der Szenarien als Input für die ASTRA-Modellierung auf der Ebene von Regierungsbezirken (S= Stuttgart, KA = Karlsruhe, FR = Freiburg, TÜ = Tübingen) abgeleitet werden.

[min/ PKW-Fahrt]

Delta zur Basis

Szenario 1	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	6.9	5.7	6.7	5.0	7.2	6.3	7.1	6.1
S ländlich	5.7	2.3	5.0	3.0	4.7	3.2	4.8	3.4
KA städtisch	6.7	5.0	6.3	5.6	6.4	5.3	6.6	5.1
KA ländlich	4.9	3.0	5.5	2.0	5.6	3.1	4.5	3.0
FR städtisch	7.2	4.7	6.4	5.7	5.1	5.2	6.3	4.7
FR ländlich	6.4	3.2	5.3	3.1	5.1	2.3	4.7	3.1
TÜ städtisch	7.0	4.8	6.6	4.5	6.2	4.7	4.9	5.1
TÜ ländlich	5.9	3.4	5.1	3.0	4.7	3.1	5.1	2.1

Delta zur Basis

Szenario 2	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	9.0	8.5	9.0	7.6	9.6	9.2	9.5	8.7
S ländlich	8.5	4.6	7.7	6.0	7.4	6.3	7.5	6.1
KA städtisch	9.1	7.7	8.3	8.0	8.7	7.8	8.9	7.8
KA ländlich	7.5	6.0	8.0	3.7	8.0	6.1	7.1	6.0
FR städtisch	9.6	7.4	8.7	8.0	6.8	7.6	8.6	7.4
FR ländlich	9.2	6.3	7.9	6.0	7.6	4.4	7.4	6.2
TÜ städtisch	9.4	7.5	8.9	7.1	8.5	7.4	6.6	7.6
TÜ ländlich	8.5	6.1	7.8	6.0	7.4	6.2	7.6	4.0

Delta zur Basis

Szenario 3	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	10.6	10.6	10.9	9.8	11.5	11.3	11.4	10.8
S ländlich	10.6	6.4	9.8	8.3	9.5	8.6	9.6	8.5
KA städtisch	11.0	9.8	9.9	10.0	10.6	9.9	10.8	9.9
KA ländlich	9.7	8.3	10.0	5.2	10.0	8.4	9.2	8.3
FR städtisch	11.5	9.5	10.6	10.0	8.2	9.8	10.5	9.5
FR ländlich	11.4	8.6	10.0	8.4	9.7	6.1	9.5	8.5
TÜ städtisch	11.3	9.6	10.8	9.2	10.5	9.5	8.1	9.8
TÜ ländlich	10.6	8.5	9.9	8.3	9.5	8.5	9.7	5.6

Quelle: PTV, Validate, eigene Berechnungen.

Abbildung 7 Reisezeitänderungen der Szenarien in ASTRA-Bezirksstruktur basierend auf Regierungsbezirken

3.2 Inputparameter II: Kostenänderung je Pkw-Fahrt

Für die Ermittlung der mittleren Kostenerhöhung je Pkw-Fahrt wird auf die gleichen Mechanismen der Erhöhung der Zu- und Abgangswiderstände zurückgegriffen.

Zu Beginn ist von folgenden Parkkosten in den einzelnen Szenarien ausgegangen worden:

Parkkosten (EUR / Zeiteinheit)	Stunde	Tag	Jahr
Szenario 1	1	10	140
Szenario 2	2	15	500
Szenario 3	4	30	1 000

Abbildung 8 Parkkosten der drei Szenarien

Stunden- und Tagesstarife haben einen direkten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl (vgl. Kapitel 3), während der Anteil der jährlichen Kosten auf das einzelne Nutzungsereignis nur einen geringen Einfluss hat. Unter Verwendung von durchschnittlichen Nutzungsdauern und -intensitäten lassen sich Parkkosten je Nutzungsgruppe ableiten und entsprechend der in Kapitel 3.1 beschriebenen Aggregationsregeln von der Ebene der Einzelrelation auf die für ASTRA erforderliche Aggregationsebene der Regierungsbezirke (und differenziert nach städtisch und ländlich) nachfragegewichtet zusammenfassen.

[EUR/ PKW-Fahrt]

Delta zur Basis

Szenario 1	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	0.6	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4
S ländlich	0.5	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.3
KA städtisch	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3
KA ländlich	0.4	0.2	0.5	0.3	0.5	0.2	0.4	0.2
FR städtisch	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3
FR ländlich	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.4	0.2
TÜ städtisch	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4
TÜ ländlich	0.5	0.2	0.5	0.2	0.4	0.2	0.5	0.2

Delta zur Basis

Szenario 2	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	2.3	1.6	2.0	1.3	2.1	1.7	2.1	1.7
S ländlich	1.8	0.9	1.7	1.0	1.6	1.2	1.7	1.0
KA städtisch	2.0	1.5	2.2	1.6	2.0	1.5	2.0	1.5
KA ländlich	1.5	1.0	1.8	0.9	1.8	1.0	1.4	0.9
FR städtisch	2.1	1.4	2.0	1.7	2.0	1.5	1.9	1.4
FR ländlich	2.0	1.2	1.7	1.0	1.6	1.0	1.7	1.1
TÜ städtisch	2.1	1.4	2.0	1.2	1.9	1.4	2.0	1.5
TÜ ländlich	1.8	0.9	1.7	0.9	1.6	1.1	1.6	1.0

Delta zur Basis

Szenario 3	S städtisch	S ländlich	KA städtisch	KA ländlich	FR städtisch	FR ländlich	TÜ städtisch	TÜ ländlich
S städtisch	5.5	4.2	4.8	3.4	5.1	4.6	5.0	4.0
S ländlich	4.4	2.4	4.0	2.5	3.8	3.1	3.8	2.1
KA städtisch	4.8	3.9	5.2	4.1	4.7	3.7	4.7	3.7
KA ländlich	3.4	2.3	4.0	2.1	4.1	2.4	3.1	2.3
FR städtisch	5.2	3.6	4.6	4.3	4.7	3.5	4.6	3.5
FR ländlich	5.0	3.1	3.8	2.6	3.5	2.6	3.9	2.9
TÜ städtisch	5.0	3.7	4.7	3.1	4.5	3.7	4.6	3.6
TÜ ländlich	4.1	2.0	3.8	2.5	3.6	2.8	3.6	2.4

Quelle: PTV, Validate, eigene Berechnungen.

Abbildung 9 Kostenänderungen der Szenarien in ASTRA-Bezirksstruktur basierend auf Regierungsbezirken

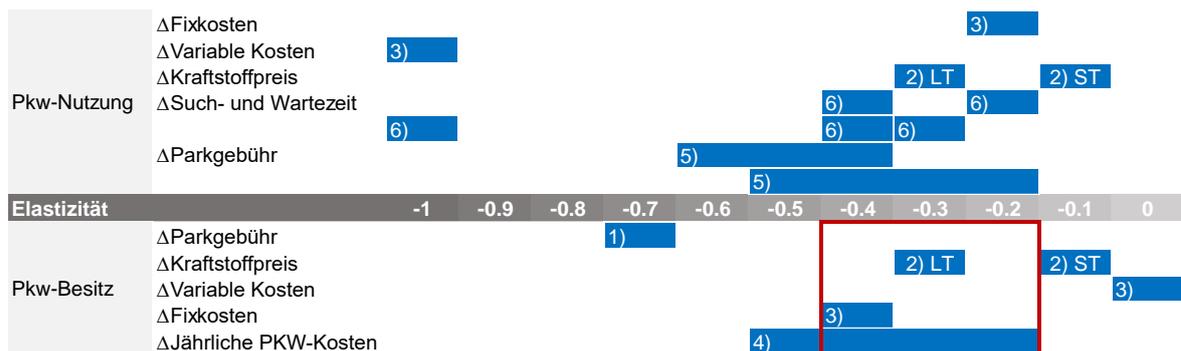
3.3 Inputparameter III: Elastizität der Kostenänderung

Für die Abschätzung der Wirkung einer Erhöhung der Parkgebühren auf den Pkw-Besitz werden Elastizitäten aus der wissenschaftlichen Literatur herangezogen. Die Elastizität gibt per Definition das Verhältnis einer prozentualen Änderung des Faktors X zur prozentualen Änderung des Faktors Y an. Da der Einfluss von Parkgebühren bisher nur vereinzelt untersucht ist, wurden weitere, vergleichbare monetäre Einflussfaktoren wie

Kraftstoffpreise, variable Kosten, Fixkosten und jährliche Pkw-Kosten ebenfalls berücksichtigt. Als relevanteste Quellen wurden dabei die Veröffentlichungen von Ostermeijer et al. (2019), Goodwin et al. (2004), de Jong et al. (2009) und Kouwenhoven et al. (2022) identifiziert. Zur Vervollständigung der Elastizitäten wurde die Recherche in einem zweiten Schritt auf Effekte auf die Pkw-Nutzung, sowie um Einflüsse von Such- und Wartezeit erweitert. Hierfür wurden die Arbeiten von Lehner, Peer (2019), sowie Widmer (2004) herangezogen. Dabei zeigt sich auch, dass Fixkosten einen größeren Einfluss auf den Pkw-Besitz haben, variable Kosten haben einen größeren Einfluss auf die Pkw-Nutzung. Dies ist durch die jeweilige Möglichkeit zur Vermeidung der Kosten zu erklären.

Goodwin et al. (2004) differenzieren Elastizitäten weiter nach Wirkung in der kurzen und der langen Frist. Die Entscheidung für oder gegen den Pkw-Besitz ist oftmals das Ergebnis eines längeren Abwägungsprozesses, daher wird die Unterscheidung der Elastizität in kurzfristig und langfristig für die Bewertung übernommen. Die Wirkung in der kurzen Frist liegt unterhalb der Wirkung in der langen Frist. Eine Übersicht über die relevanten Elastizitäten zeigt Abbildung 10.

Elastizitäten in der internationalen Literatur



Quelle: M-Five, eigene Abbildung, basierend auf 1) Ostermeijer et al. (2019), 2) Goodwin et al. (2004), 3) de Jong et al. (2009), 4) Kouwenhoven et al. (2022), 5) Lehner, Peer (2019), 6) Widmer (2004), ST = Kurze Frist (bis 2 Jahre), LT = Lange Frist (bis 5 Jahre).

Abbildung 10 Übersicht zu Elastizitäten in der internationalen Literatur

Zur Anwendung auf die konkrete Fragestellung wurde daraus eine Elastizität von -0,2 für die kurze Frist bis zwei Jahre, und von -0,4 für die lange Frist bis fünf Jahre abgeleitet. Eine Elastizität von -0,2 meint dabei, eine Erhöhung der jährlichen Parkgebühren um 1 Prozent führt zu einer Reduktion des Pkw-Besitzes um -0,2 Prozent. Für die Anwendung der Elastizität wurde die Erhöhung der jährlichen Bewohnerparkgebühr in das Verhältnis zu den jährlichen Pkw-Gesamtkosten (ohne zusätzlich anfallende Stunden- und Tagesparkkosten), in Höhe von EUR 5 000, gesetzt. Damit ergibt sich bei einer Erhöhung der Bewohnerparkgebühr in Szenario 3 um EUR 970 auf EUR 1 000 eine Erhöhung um 19,4 Prozent, die in der kurzen Frist zu einer Reduktion des Pkw-Besitzes um -3,9 Prozent führt und in der langen Frist um -7,8 Prozent. Mit dieser Zwischenrechnung wird dann die Reduktion des Pkw-Besitzes über eine sinkende Nachfrage nach Neuzulassungen sowie über erhöhte Verschrottungsraten in ASTRA modelliert. Dabei ist zu beachten, dass Elastizitäten lediglich Durchschnittseffekte abbilden können. Die Preissensibilität und

Reaktionsstärke im Verkehr ist auch abhängig von Gegebenheiten wie dem Reisezweck, den weiteren Reiseoptionen oder dem sozioökonomischen Status.

3.4 Inputparameter IV: Parkplatz zu Pkw Verhältnis

Für die Abschätzung der Wirkung einer Reduktion der Parkplätze auf den Pkw-Besitz werden Schätzungen zur Anzahl an verfügbaren Parkplätzen des ADAC herangezogen (ADAC 2020). Demnach stehen ca. 160 Mio. Parkplätze für 65 Mio. Fahrzeuge in Deutschland zur Verfügung. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von Parkplätzen zu Pkw von 2,46. Durch eine Reduktion der Anzahl an verfügbaren Parkplätzen sinkt auch das Verhältnis. Damit steigt der Zeitaufwand, einen freien Parkplatz zu finden, sowie die Zugangs- und Abgangszeit zu diesem Parkplatz. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass eine Verschlechterung des Verhältnisses zu einer Verhaltensänderung und damit zu einer Abschaffung von Pkw führt. Allerdings muss als Voraussetzung dafür die Verschlechterung deutlich bemerkbar sein, und zeitlich andauernd. Durch die so ausgelöste Reduktion der Pkw-Flotte steigt das Verhältnis von Parkplatz zu Pkw wieder an. Dieser Prozess findet statt, bis sich das Verhältnis auf einem akzeptablen Niveau erneut einpendelt. Dieses Niveau liegt unter dem Ausgangsniveau, da angenommen wird, dass eine leichte Verschlechterung in Kauf genommen wird, und nicht zu einer sofortigen Abschaffung des Pkw führt. Mit dieser Zwischenrechnung wird dann die Reduktion des Pkw-Besitzes über eine sinkende Nachfrage nach Neuzulassungen sowie über erhöhte Verschrottungsraten in ASTRA modelliert.

Die Stärke der Reaktion wird durch viele weitere Faktoren beeinflusst, die ebenfalls begleitend adressiert werden können. So ist die Abschaffung eines Pkw in Haushalten, in denen weitere Alternativen zur Fortbewegung zur Verfügung stehen, leichter. Auch kann durch entsprechend ausgestaltete Maßnahmen zuerst der Besitz eines Zweit- oder Drittwagen adressiert werden. Die Mietpreise für private Parkplätze sowie deren Verfügbarkeit beeinflussen die Entscheidung ebenfalls.

Die Anzahl an angenommenen reduzierten Parkplätzen ist aus den Parknutzerguppen abgeleitet, berücksichtigt damit die Differenzierung in öffentliches und privates Parken, und beträgt in Baden-Württemberg 0,4 Mio. in Szenario 1, 0,9 Mio. in Szenario 2 und 1,3 Mio. in Szenario 3. Dahinter liegt die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der 160 Mio. Parkplätze innerhalb von Deutschland auf 16,7 Mio. Parkplätze innerhalb von Baden-Württemberg.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kurzstudie vorgestellt. Um die Wirkung der einzelnen Szenarien getrennt voneinander betrachten zu können, und gleichzeitig eine möglichst übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, wird eine schrittweise Einführung der Szenarien modelliert. Szenario 1 wird in 2025, Szenario 2 in 2027 und Szenario 3 in 2030 eingeführt. Die Wirkung der einzelnen Szenarien kann dabei auch getrennt voneinander, für sich, betrachtet werden, indem mit dem Referenzszenario im entsprechenden Jahr abgeglichen wird. Die Wirkung wird jeweils im folgenden Jahr ausgewiesen.

4.1 Wirkung auf die Verlagerung von Pkw-Verkehr

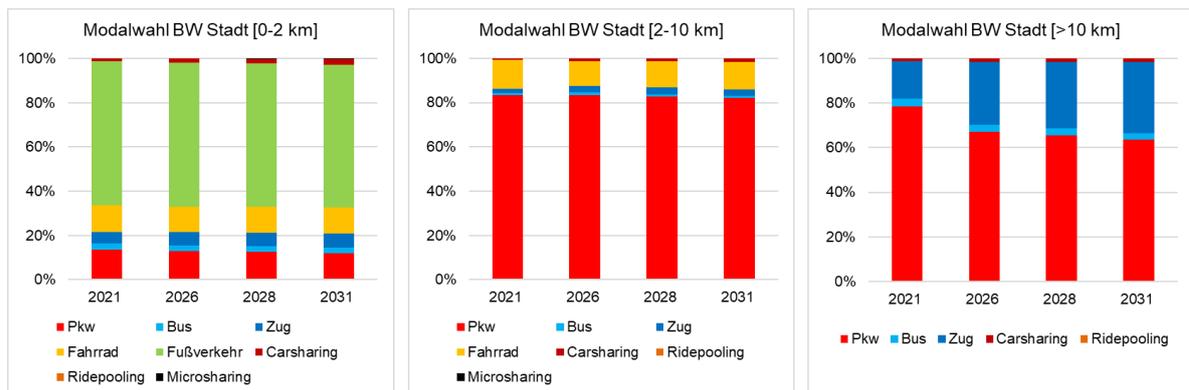
Die Modellierung basiert auf dem Referenzszenario REF-2020 aus der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) des BMDV, das alle politischen Maßnahmen und ökonomischen Entwicklungen bis August 2020 berücksichtigt (siehe Schade et al. 2022). Auch ohne die Einführung eines Parkraum-Managements sind bereits Maßnahmen beschlossen und Entwicklungen zu erwarten, die beispielsweise bis 2030 zu einer Reduktion der Pkw-Fahrten führen. Daher wird in einem ersten Schritt das Referenzszenario vorgestellt. Mit diesem Szenario sind die Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 zu vergleichen, d.h. eine Reduktion der Pkw-Fahrten in Szenario 3 gegenüber Szenario 2 ist nicht ausschließlich auf die Verschärfung der Annahmen in den Szenarien zurückzuführen, sondern auch auf ohnehin stattfindende Veränderungen im Referenzszenario.

Die Ergebnisse werden differenziert nach den Distanzbändern 0-2 km, 2-10 km und über 10 km Strecke (ohne Fernstrecken¹) ausgewiesen. Diese Differenzierung ermöglicht eine gezieltere Zuordnung der Wirkung. Auf sehr kurzen Strecken sind die Pkw-Kosten und -Zeiten gering. Eine deutliche Erhöhung führt hier zu einer überproportionalen Verschlechterung, gleichzeitig stehen viele attraktive Alternativen zur Verfügung. Auf langen Strecken ist die Kostenerhöhung im Vergleich zu den bisherigen Kosten weniger drastisch, gleichzeitig fallen bspw. Fußverkehr und Fahrrad als Alternativen weg. Die Wirkung auf die Reduktion der Pkw-Fahrten ist damit auf langen Strecken geringer.

Die dritte Unterscheidung, neben Szenario und Distanz, wird anhand des Raumes in dem die Fahrt startet vorgenommen. 80 Prozent der Fahrten finden innerhalb ihres Raumes statt. Hier wird zwischen Stadt und Land unterschieden. Die Ergebnisse werden dann aggregiert für Baden-Württemberg und separat für die beiden Einflussfaktoren Parkgebühr und Parkplatz ausgewiesen.

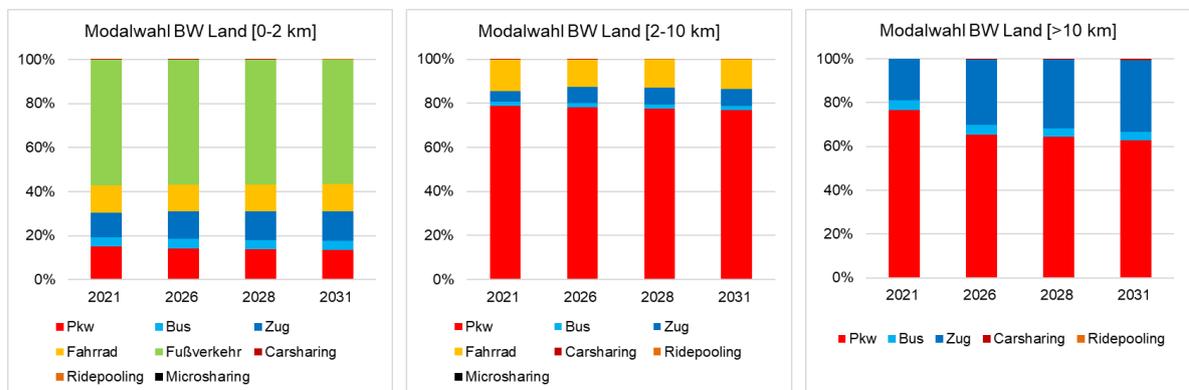
¹ Als Fernstrecke werden modellseitig Fahrten zwischen zwei NUTS2-Zonen definiert. Baden-Württemberg ist in die vier NUTS2-Zonen Stuttgart, Karlsruhe, Freiburg und Tübingen unterteilt.

Die Modalwahl im Referenzszenario



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 11 Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, im Referenzszenario

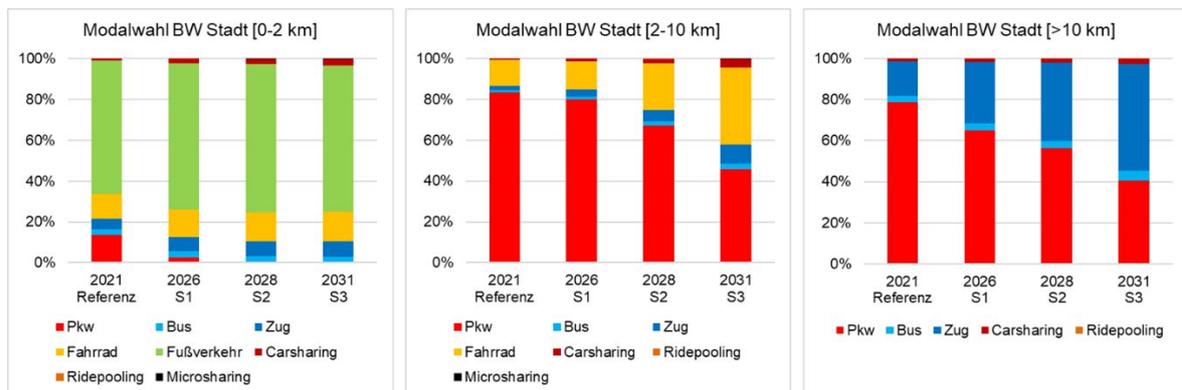


Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 12 Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, im Referenzszenario

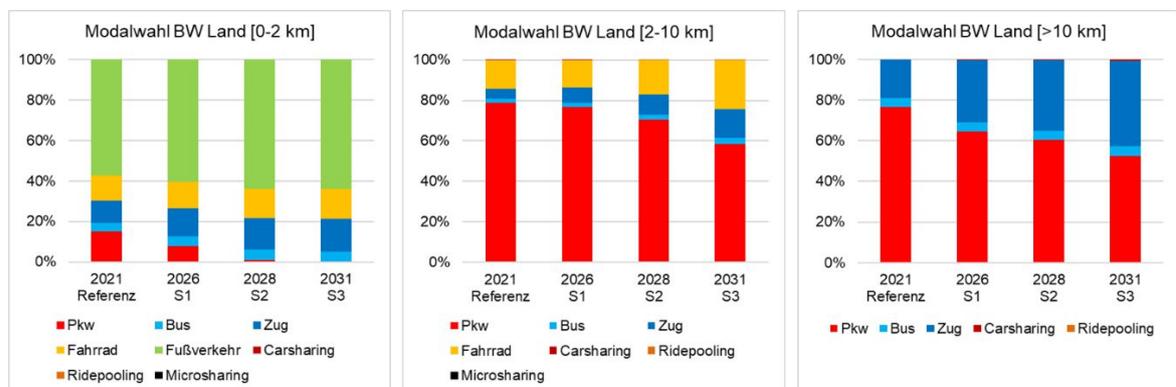
Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Modalwahl nach Anzahl an Wegen je Verkehrsmittel in Baden-Württemberg, unterschieden nach Distanz und Raum, im Referenzszenario. Auf der Kurzstrecke bis 2 km werden in der Stadt über 60 Prozent der Wege zu Fuß zurückgelegt, auf dem Land knapp unter 60 Prozent. Bei Wegelängen zwischen 2 bis 10 km dominiert der Pkw stark, auf längeren Strecken über 10 km ist auch die Zugfahrt relevant. Insbesondere auf den Strecken über 10 km Länge zeigt sich, dass bereits Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs beschlossen wurden, die in 2026 Wirkung zeigen. In 2031 werden ca. ein Drittel der Wege über 10 km mit dem Zug zurückgelegt.

Die Modalwahl nach Erhöhung der Parkgebühren



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 13 Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Erhöhung der Parkgebühren



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

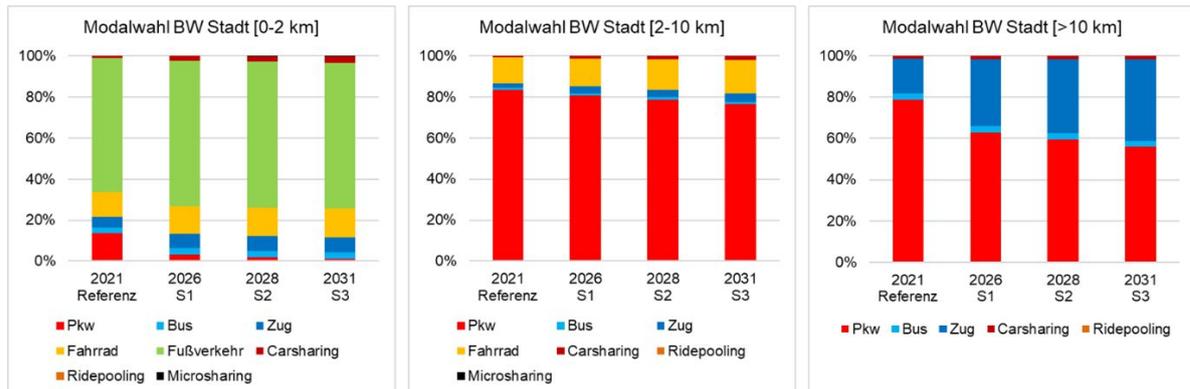
Abbildung 14 Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Erhöhung der Parkgebühren

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die Modalwahl nach Anzahl an Wegen je Verkehrsmittel in Baden-Württemberg, unterschieden nach Distanz und Raum, nach Erhöhung der Parkgebühren. Hier fließen die in Unterkapitel 3.2 vorgestellten Kostenänderung je Pkw-Fahrt ein. Die Werte in 2021 zeigen erneut die Werte aus dem obigen Referenzszenario. In 2025 wird Szenario 1 eingeführt, im darauffolgenden Jahr 2026 zeigt das Szenario 1 dann seine in der Abbildung ausgewiesene Wirkung. Dies gilt analog für Szenario 2 in 2028 und Szenario 3 in 2031.

Die Reduktion der Pkw-Fahrten fällt über alle Distanzen in der Stadt größer aus als auf dem Land. Dies ergibt sich durch die Kostenänderungen, die für städtische Fahrten relativ höher liegen als für ländliche Fahrten. Sowohl die Inputparameter als auch die darauffolgende Modellreaktion bilden Durchschnittswerte ab. Die Reduktion der Pkw-Fahrten auf null Prozent auf Strecken bis 2 km Länge in Szenario 3 ist daher kritisch zu hinterfragen. Szenario 3 zeigt sich als sehr ambitioniertes Szenario. Aufgrund der sehr hohen Kosten pro Fahrt verliert der Pkw bei der Wahl des Verkehrsmittels stark an Attraktivität. Je kürzer der Weg, desto höher ist auch der relative Aufschlag. Ist jedoch ein privater Parkplatz an Start und Ziel vorhanden, zeigt die Erhöhung der Parkgebühr darauf keine Wirkung.

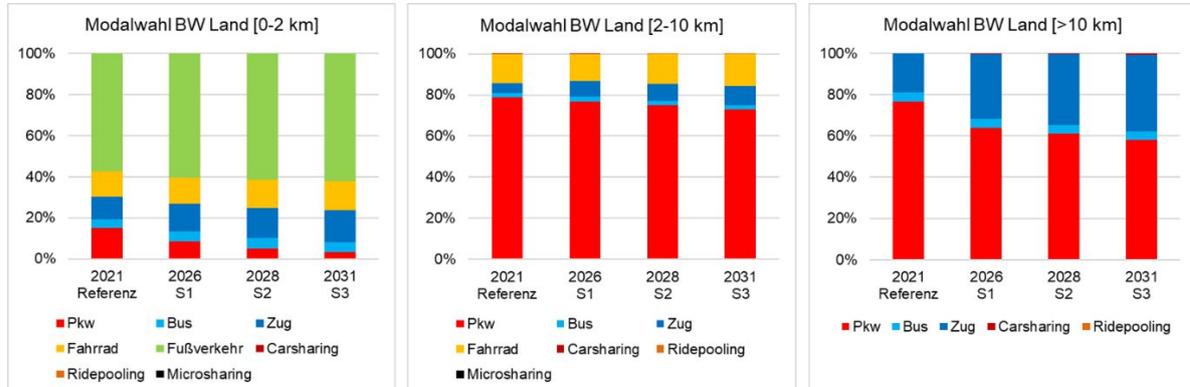
Auf den Strecken von 2 bis 10 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten um bis zu 44 Prozent in Szenario 3 in der Stadt, und um bis zu 25 Prozent in Szenario 3 auf dem Land. Auf Strecken über 10 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten um bis zu 36 Prozent in Szenario 3 in der Stadt, und um bis zu 16 Prozent in Szenario 3 auf dem Land. Diese Angaben beziehen sich auf die prozentuale Änderung der Anzahl an Pkw Fahrten im Jahr 2031 zwischen Szenario 3 und dem Referenzszenario. Sie werden im Folgenden für alle Abbildungen ausgewiesen.

Die Modalwahl nach Reduktion der Parkplätze



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 15 Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Reduktion der Parkplätze



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 16 Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Reduktion der Parkplätze

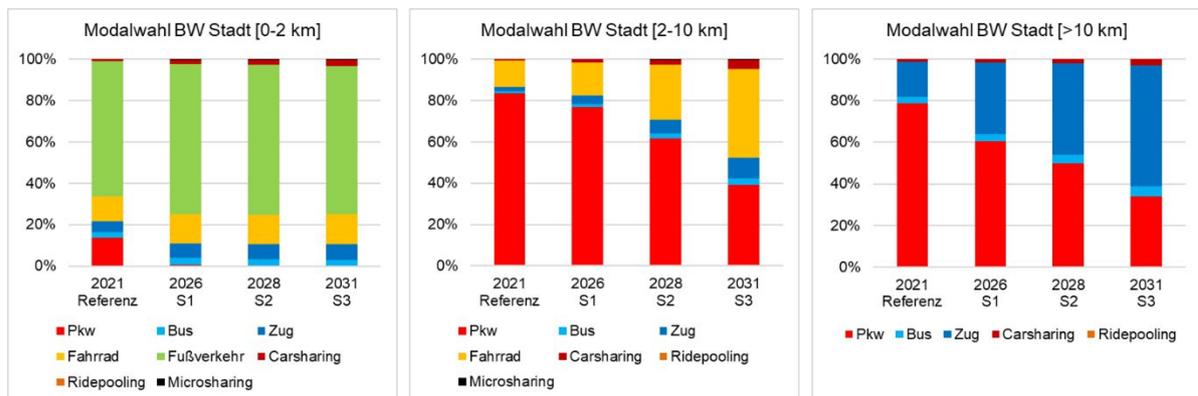
Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Modalwahl nach Anzahl an Wegen je Verkehrsmittel in Baden-Württemberg, unterschieden nach Distanz und Raum, nach Reduktion der Parkplätze. Hier fließen die in Unterkapitel 3.1 vorgestellten Zeitänderung je Pkw Fahrt ein. Die Reduktion der Pkw-Fahrten fällt in diesem Ergebnis über alle Distanzen in Stadt und Land in einer ähnlichen Größenordnung aus. Auf den Wegen bis 2 km ist die Reduktion in der Stadt etwas höher.

Im Vergleich zu der zuvor untersuchten Maßnahme zur Erhöhung der Parkgebühren fällt die Reduktion an Pkw-Fahrten hier schwächer aus. Dies liegt auch an den getroffenen Annahmen, der prozentuale Anstieg der Zeiten je Fahrt ist geringer als der prozentuale

Anstieg der Kosten je Fahrt. Auch auf den kurzen Strecken bis 2 km finden weiterhin Fahrten mit dem Pkw statt.

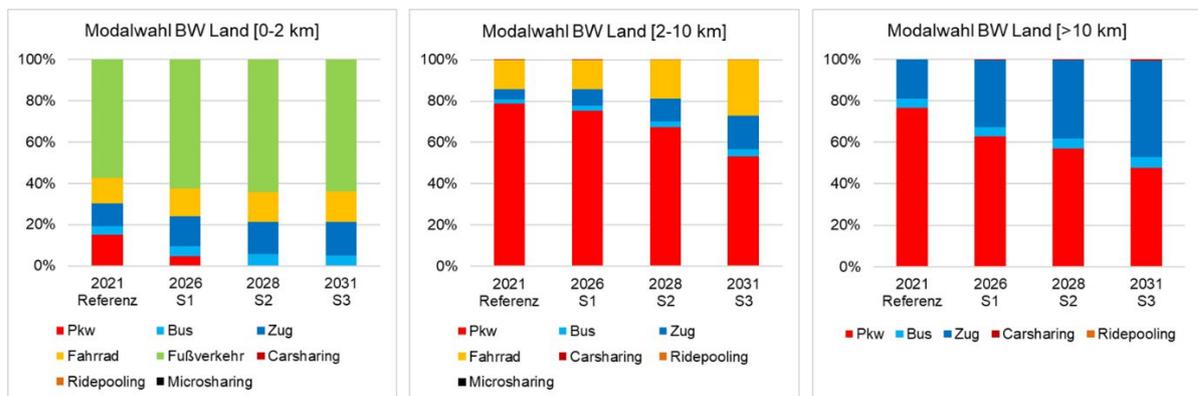
Auf den Strecken bis 2 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten um bis zu 90 Prozent in Szenario 3 in der Stadt, und um bis zu 77 Prozent in Szenario 3 auf dem Land. Auf den Strecken von 2 bis 10 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten um bis zu 7 Prozent in Szenario 3 in der Stadt, und um bis zu 5 Prozent in Szenario 3 auf dem Land. Auf Strecken über 10 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten um bis zu 12 Prozent in Szenario 3 in der Stadt, und um bis zu 8 Prozent in Szenario 3 auf dem Land.

Die Modalwahl nach Einführung beider Maßnahmen



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 17 Modalwahl für BW, Stadt, nach Distanz, nach Einführung beider Maßnahmen



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

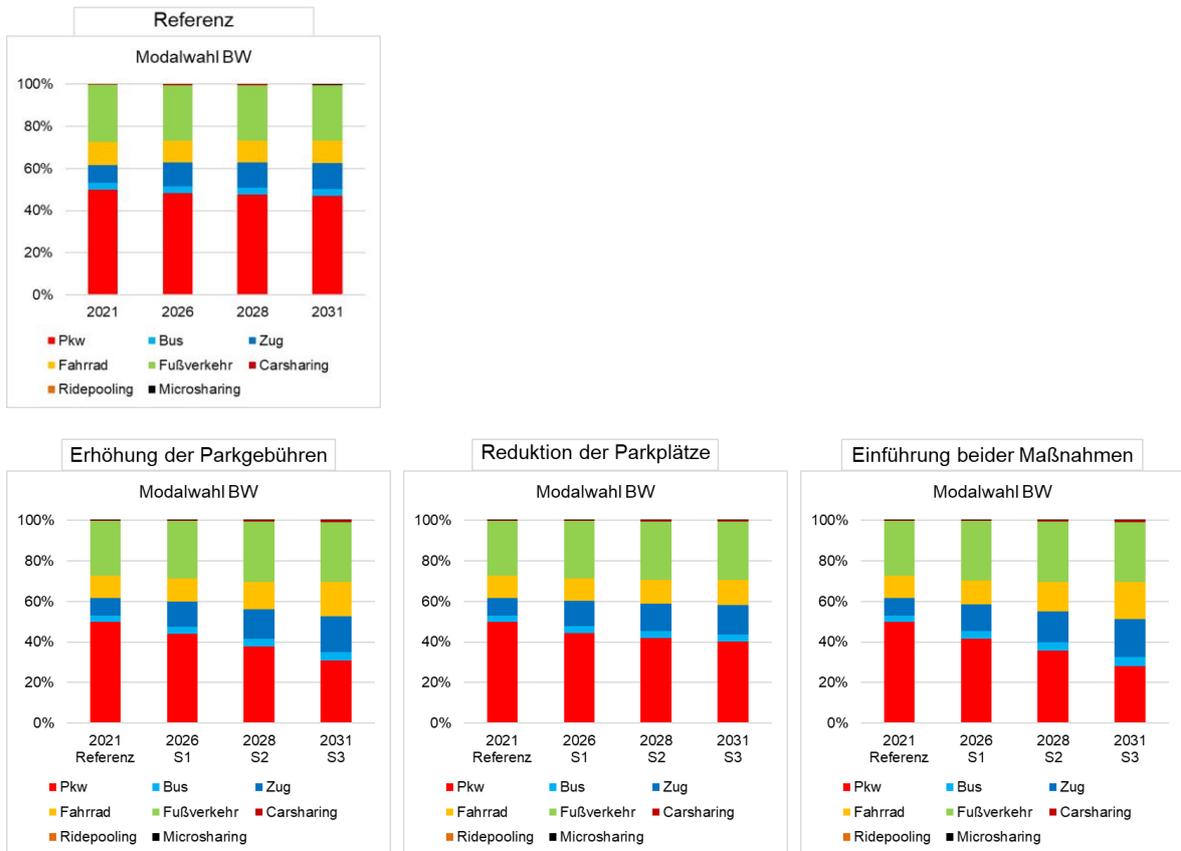
Abbildung 18 Modalwahl für BW, Land, nach Distanz, nach Einführung beider Maßnahmen

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Modalwahl nach Anzahl an Wegen je Verkehrsmittel in Baden-Württemberg, unterschieden nach Distanz und Raum, nach Einführung beider Maßnahmen. Hier fließen sowohl die Kostenänderungen als auch die Zeitänderung je Pkw Fahrt ein. Die Auswirkungen auf die Pkw-Nutzung sind dabei, wie zu erwarten, am stärksten.

In Szenario 1 sinkt der Anteil an Pkw Fahrten auf den Strecken von 2 bis 10 km Länge in der Stadt um bis zu 8 Prozent und auf dem Land um bis zu 4 Prozent. Auf Strecken über 10 km Länge sinkt in Szenario 1 der Anteil an Pkw Fahrten in der Stadt um bis zu 10 Prozent und auf dem Land um bis zu 4 Prozent. In Szenario 2 zeigt sich eine stärkere Abnahme. Hier sinkt der Anteil an Pkw Fahrten auf den Strecken von 2 bis 10 km Länge in der Stadt um bis zu 25 Prozent und auf dem Land um bis zu 13 Prozent. Auf Strecken über 10 km Länge sinkt in Szenario 2 der Anteil an Pkw Fahrten in der Stadt um bis zu 24 Prozent und auf dem Land um bis zu 11 Prozent. Die stärkste Abnahme zeigt sich in Szenario 3. Hier sinkt der Anteil an Pkw Fahrten von 2 bis 10 km Länge um bis zu 52 Prozent in der Stadt und um bis zu 31 Prozent auf dem Land. Auf Strecken über 10 km Länge sinkt der Anteil an Pkw Fahrten in Szenario 3 um bis zu 47 Prozent in der Stadt und um bis zu 24 Prozent auf dem Land.

Die Annahmen, die hinter diesen kombinierten Ergebnissen stehen sind, insbesondere in Szenario 3, als sehr ambitioniert einzuschätzen. Vor diesem Hintergrund sollte auch ihre ausgewiesene Wirkung betrachtet werden. Dennoch zeigt die Kombination auf, welchen Beitrag ein klimafreundliches Parkraum-Management leisten kann.

Die Modalwahl über alle Wege



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 19 Modalwahl für BW, aggregiert, nach Einführung beider Maßnahmen

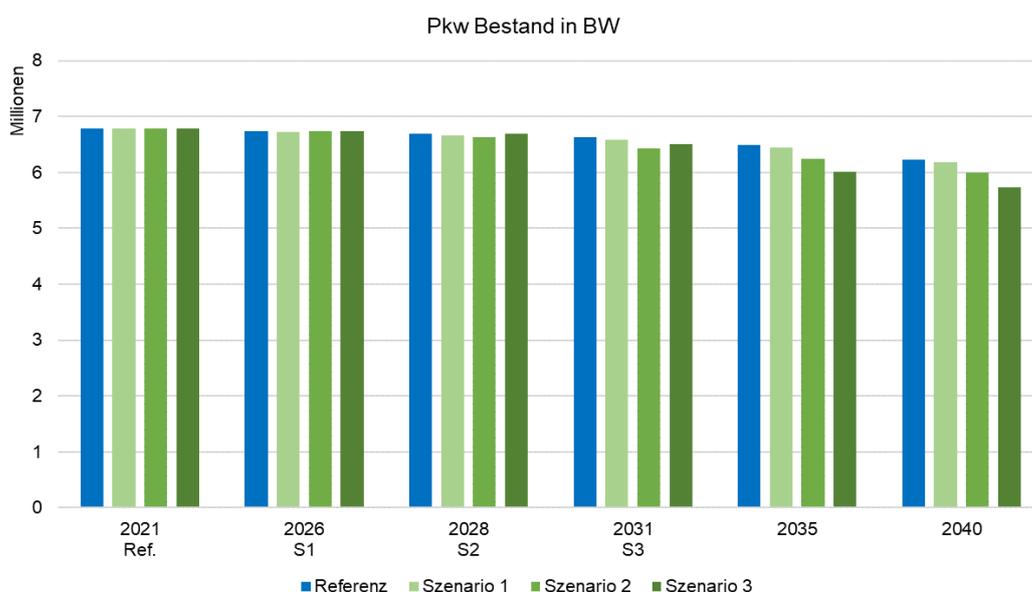
Abbildung 19 stellt die drei betrachteten Varianten eines klimafreundlichen Parkraum-Managements noch einmal in einer aggregierten Form gegenüber. Hier wird nicht weiter nach Distanz und Raum unterschieden, sondern über alle Fahrten aggregiert. Damit lässt sich die Wirksamkeit der Maßnahmen auf einer höheren Ebene vergleichen. Die Reduktion der Parkplätze bzw. die damit einhergehende Erhöhung der Zeiten führt zu einer geringeren Reduktion der Pkw-Fahrten als die Erhöhung der Parkgebühren. Die Einführung beider Maßnahmen zeigt die größte Wirkung. Hierzu ist anzumerken, dass die Anzahl an sehr kurzen Wegen in der ASTRA-Modellierung leicht überschätzt wird, was zu einem erhöhten Anteil an Fußverkehr und zu einem verringerten Anteil an Pkw-Fahrten führt.

An dieser Stelle ist die Bedeutung der zu Grunde liegenden Annahmen hervorzuheben. Eine Reduktion der Anzahl an Parkplätzen zeigt nicht per se eine schwächere Wirkung als eine Erhöhung der Parkgebühren. Beide Maßnahmen sind geeignet um den Anteil an Pkw-Fahrten zu reduzieren. Es ist vielmehr die Höhe der Ausgestaltung der einzelnen Maßnahmen, die deren Wirkung maßgeblich beeinflusst. Im Rahmen dieser Studie wurden Annahmen getroffen, die ambitioniert, aber nicht illusorisch erscheinen. Diese wurden im Vorfeld festgelegt und für Szenario 1 mit einer geringeren Ausprägung, für Szenario 3 mit einer stärkeren Ausprägung beschlossen.

4.2 Wirkung auf die Verringerung der Pkw-Flotte

Im Folgenden wird die Veränderung der PKW-Flotte in Baden-Württemberg in den drei Szenarien erläutert.

Der Pkw Bestand nach Erhöhung der Parkgebühren



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

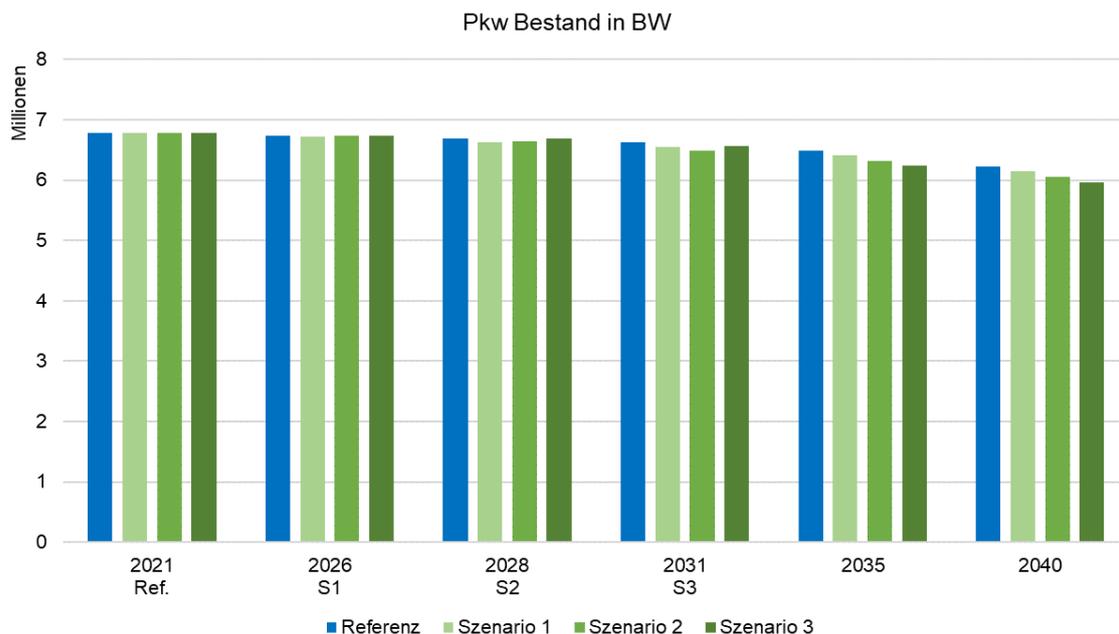
Abbildung 20 Pkw Bestand in BW, nach Erhöhung der Parkgebühren

Abbildung 20 zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestands in Baden-Württemberg im Referenzszenario, sowie nach Erhöhung der Parkgebühren. Die Modellierung des Pkw-Bestands basiert ebenfalls auf dem Referenzszenario REF-2020 der MKS (Schade et al. 2022). Die blaue Säule zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestands im Zeitverlauf im Referenzszenario, die drei grünen Säulen zeigen die Entwicklung des Pkw-Bestands im Zeitverlauf in den Szenarien 1 bis 3.

Hier fließt die in Unterkapitel 3.3 vorgestellte Elastizität der Kostenänderungen ein, jedes Szenario zeigt damit eine kurzfristige (bis zwei Jahre) und eine langfristige (bis fünf Jahre) Entwicklung. Die Abbildung zeigt, dass auch der Pkw-Bestand im Referenzszenario im Zeitraum bis 2040 leicht abnimmt. Diese Entwicklung wird unter anderem durch die Verschrottung der Fahrzeuge, die in den neuzulassungsstarken Jahrgängen 2016 bis 2019 zugelassen wurden, und nun entsprechend gealtert sind, verursacht. Die folgenden Jahre ab 2020 weisen eine geringere Anzahl an Neuzulassungen auf, darin sind auch Pandemie-Effekte und Lieferketten-Probleme abgebildet.

Durch die Erhöhung der Parkgebühren reduziert sich der Pkw-Bestand in Baden-Württemberg in der langen Frist in Szenario 1 um 0,05 Mio. Pkw. In Szenario 2 beträgt die Reduktion 0,25 Mio. Pkw und in Szenario 3 beträgt die Reduktion 0,53 Mio. Pkw. Das entspricht einer Reduktion von 0,7 Prozent in Szenario 1, von 3,8 Prozent in Szenario 2 und von 7,8 Prozent in Szenario 3 gegenüber dem Pkw-Bestand der Referenz im Jahr 2024 ohne Maßnahmen.

Der Pkw Bestand nach Reduktion der Parkplätze



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 21 Pkw Bestand in BW, nach Reduktion der Parkplätze

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestands in Baden-Württemberg im Referenzszenario, sowie nach Reduktion der Parkplätze. Hier fließt das in Unterkapitel 3.4 vorgestellte Konzept des „Parkplatz-pro-Pkw“-Schlüssels ein. Die Modellierung der Flotte berücksichtigt hier ebenfalls zeitliche Verzögerungen und erreicht das volle abgeschätzte Pkw-Reduktionspotential nach fünf Jahren.

Durch die Reduktion der Parkplätze reduziert sich der Pkw-Bestand in Baden-Württemberg in der langen Frist in Szenario 1 um 0,09 Mio. Pkw. In Szenario 2 beträgt die Reduktion 0,19 Mio. Pkw und in Szenario 3 beträgt die Reduktion 0,28 Mio. Pkw. Das entspricht einer Reduktion von 1,4 Prozent in Szenario 1, von 2,7 Prozent in Szenario 2 und von 4,2 Prozent in Szenario 3 gegenüber dem Pkw-Bestand der Referenz im Jahr 2024 ohne Maßnahmen.

Der Pkw Bestand nach Einführung beider Maßnahmen

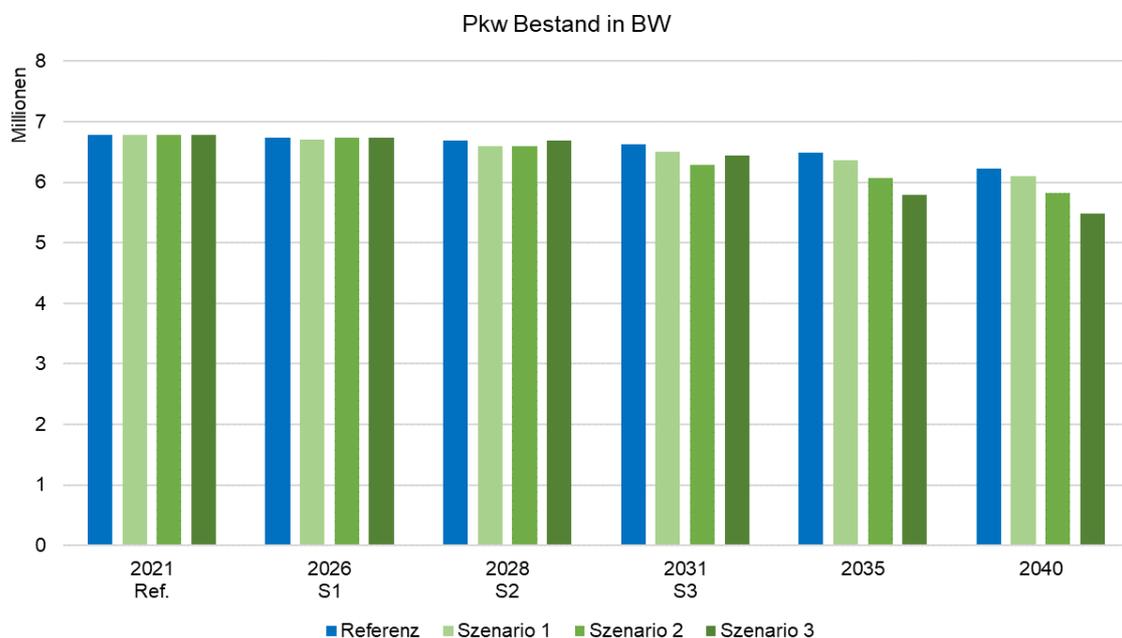


Abbildung 22 Pkw Bestand in BW, nach Einführung beider Maßnahmen

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung des Pkw-Bestands in Baden-Württemberg im Referenzszenario und nach Einführung beider Szenarien. Hierfür werden die zuvor ausgewiesenen Effekte addiert. Durch die Einführung beider Maßnahmen reduziert sich der Pkw-Bestand in der langen Frist in Szenario 1 um 0,14 Mio. Pkw. In Szenario 2 beträgt die Reduktion 0,44 Mio. Pkw und in Szenario 3 beträgt die Reduktion 0,81 Mio. Pkw. Das entspricht einer Reduktion von 2,1 Prozent in Szenario 1, von 6,5 Prozent in Szenario 2 und von 11,9 Prozent in Szenario 3 gegenüber dem Pkw-Bestand der Referenz im Jahr 2024 ohne Maßnahmen.

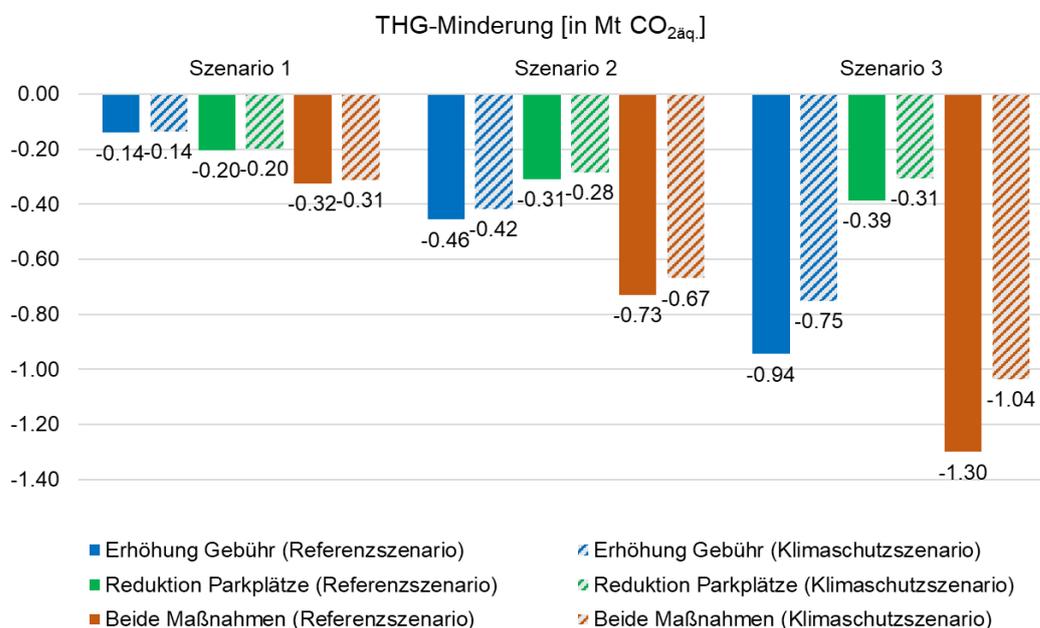
Als Voraussetzung für die hier abgebildete Wirkung gilt die Zusätzlichkeit der Maßnahme zur Wirkung der bereits ergriffenen Bepreisungs-Maßnahme. Werden nur die Parkplätze verknappt, die aufgrund eines veränderten Mobilitätsverhaltens, ausgelöst durch eine Erhöhung der Parkgebühren, frei werden, so ist keine zusätzliche Wirkung zu erwarten.

Werden darüber hinaus die Parkplätze wie in Unterkapitel 3.4 beschrieben reduziert, so sind die ausgewiesenen additiven Effekte zu erwarten.

4.3 Klimaschutzwirkung

Um die Wirksamkeit eines klimafreundlichen Parkraum-Managements zu bewerten, wird an dieser Stelle die THG-Minderung ausgewiesen. Ein großer Einflussfaktor in der Berechnung der THG-Minderung ist die Elektrifizierung der Pkw-Flotte. Vollelektrische Pkw werden mit Nullemissionen im Verkehrssektor bilanziert.² Damit spart eine stark elektrifizierte Flotte weniger Emissionen durch Reduktion der Anzahl an Fahrten ein. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, wird die THG-Minderung sowohl für das Referenzszenario, als auch für ein Szenario mit ambitioniertem Klimaschutz und damit hohen Anteilen an vollelektrischen Pkw in der Flotte ausgewiesen.

Im Referenzszenario wird für ganz Deutschland ein Bestand von 6,5 Mio. vollelektrischen Pkw und 2,9 Mio. Plug-in Hybriden Ende des Jahres 2030 abgeschätzt. Dies entspricht einem Anteil von 14 Prozent vollelektrischer Pkw im Bestand. Im Szenario mit ambitioniertem Klimaschutz wird eine Politik zu Grunde gelegt, die das politisch gesetzte Ziel von 15 Mio. vollelektrischen Pkw im Bestand im Jahr 2030 nur knapp verfehlt. Hierfür werden 14,5 Mio. vollelektrische Pkw und 3,5 Mio. Plug-in Hybride Ende des Jahres 2030 erwartet. Dies entspricht einem Anteil von 31 Prozent vollelektrischer Pkw im Bestand.



Quelle: M-Five, ASTRA-BW, eigene Berechnungen.

Abbildung 23 THG-Minderung durch klimafreundliches Parkraum-Management

² Die Art der Bilanzierung von E-PKW ist durch die internationale Klimapolitik und das nationale Klimaschutzgesetz vorgegeben. Der Kritik, dass bei der Stromerzeugung ebenfalls Treibhausgase entstehen, ist entgegenzuhalten, dass (1) die THG-Emission im Stromsektor bilanziert werden, und (2) dass durch den Dekarbonisierungs-Pfad des Stromsektors, dieser in 2030 bereits 80% grünen Strom erzeugen wird.

Abbildung 23 weist die THG-Minderung der Parkraum-Management Szenarien im ersten Jahr nach der Einführung der Maßnahme aus. Das ist das Jahr 2026 in Szenario 1, das Jahr 2028 in Szenario 2 und das Jahr 2031 in Szenario 3. Auch innerhalb des gleichen Szenarios (bspw. des Referenzszenarios) steigt die Rate der Elektrifizierung im Zeitverlauf an, und wirkt sich auf die hier abgebildete THG-Minderung für die einzelnen Szenarien geringfügig aus. Dennoch wird die schrittweise Einführung der Szenarien, Szenario 1 zu einem früheren Zeitpunkt, gefolgt von Szenario 2 und Szenario 3 zu einem späteren Zeitpunkt, als plausibles Szenario eingeschätzt. Damit ist die hier ausgewiesene THG-Minderung zu erwarten.

In Szenario 1 wirkt die Reduktion der Parkplätze stärker als die, gegenüber heute nur geringfügige, Erhöhung der Parkgebühr. Die Kombination der beiden Maßnahmen spart pro Jahr etwa 0,3 Mt CO_{2äq.} ein. In Szenario 2 und Szenario 3 wirkt der Effekt der Erhöhung der Gebühren stärker als die Reduktion der Anzahl öffentlicher Parkplätze. Durch Bepreisung können hier etwa 0,4 Mt CO_{2äq.} pro Jahr in Szenario 2 und bis etwa 0,9 Mt CO_{2äq.} pro Jahr in Szenario 3 eingespart werden. Durch Kombination der beiden Maßnahmen zur Erhöhung der Gebühr und Reduktion der Parkplätze erreicht das Szenario 2 eine THG-Minderung von etwa 0,7 Mt CO_{2äq.} pro Jahr und das Szenario 3 von bis zu 1,3 Mt CO_{2äq.} pro Jahr.

Damit zeigt die Abbildung, dass ein klimafreundliches Parkraum-Management insbesondere bei einem weniger ambitionierten Hochlauf der E-Mobilität, aber auch bei einer stärker elektrifizierten Pkw-Flotte, eine geeignete Maßnahme zur Reduktion der Emissionen in 2030 darstellt. Damit kann es auch einen wertvollen Beitrag zur Einhaltung der Klimaschutzziele leisten.

4.4 Ausblick und weitere Forschungsfragen

Die hier vorgelegte Untersuchung eines klimafreundlichen Parkraum-Managements dient in erster Linie dazu, die Wirkungsweisen der Maßnahmen zu identifizieren und deren Effekte grob abzuschätzen. Es kann gezeigt werden, dass die Bepreisung und Verknappung von Parkraum einen positiven Effekt auf die Minderung der Treibhausgase im Verkehrssektor hat.

Dabei wurde basierend auf den ausgewiesenen Parknutzerguppen aus Abbildung 5 eine räumliche Differenzierung bei der Berechnung der Widerstände, und somit bei der Einführung der Maßnahmen, berücksichtigt. Die Reisezeitänderungen in Abbildung 7 zeigen für jede Verbindung einen erhöhten Zeitaufwand, dieser fällt jedoch bei ländlichen Fahrten deutlich geringer aus als bei städtischen Fahrten. Somit werden in dem hier entwickelten Ansatz flächendeckend Maßnahmen ergriffen, diese sind in ihrer Ausprägung jedoch an regional differenzierte, lokale Gegebenheiten angepasst. An dieser Stelle eröffnet sich weiterer Forschungsbedarf. Aufbauend auf dieser Grobabschätzung kann eine vertiefte Betrachtung, entweder anhand von Fallstudien oder mit einer höheren räumlichen Auflösung, die regional unterschiedlichen Gegebenheiten untersuchen und räumliche

Voraussetzungen in der Ausgestaltung der Maßnahmen stärker berücksichtigen. Damit lässt sich am Ende auch eine detailliertere Vorhersage über die regionale Einsparung von THG-Emissionen treffen. Dies kann weiterhin in Form von unterschiedlichen Szenarien passieren.

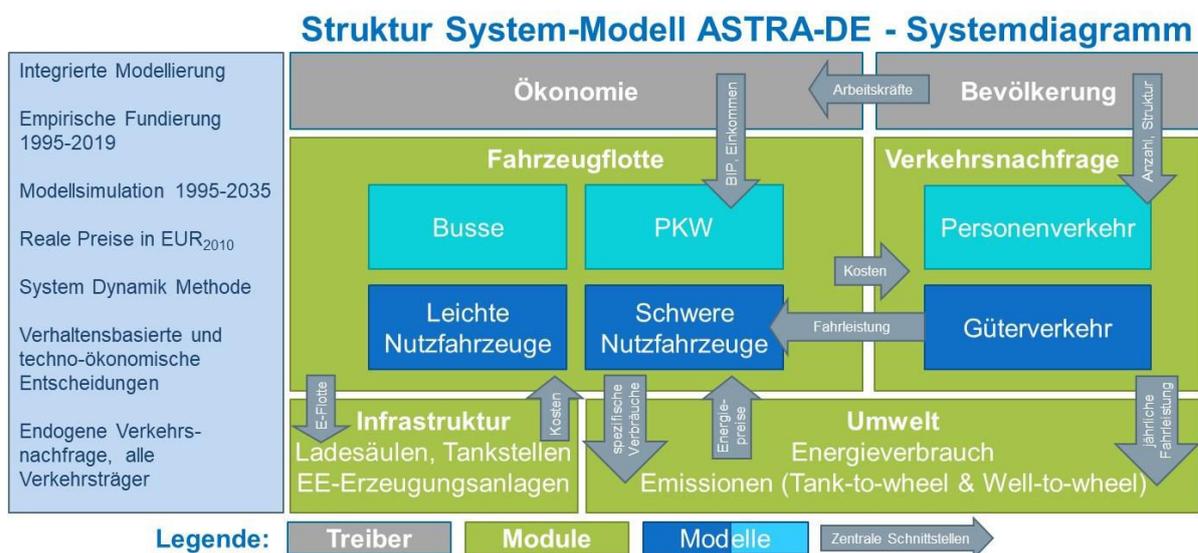
Zusätzlich empfiehlt sich die Verbesserung der Datengrundlage, insbesondere für die Anzahl an verfügbaren Parkplätzen aufgeschlüsselt nach Nutzungstyp (freier Straßenrand, Straßenparkstand, öffentliche Parkhäuser, Park- und Stellplätze). Eine zweite offene Fragestellung wäre die Entwicklung einer Schätz-Methodik für die Anzahl der Parkmöglichkeiten am freien Straßenrand, da diese vermutlich nicht flächendeckend erhoben werden kann.

Außerdem kann anhand von ausgewählten Kommunen, die bereits erfolgreich eine der beiden Maßnahmen eingeführt haben, die Reaktionsstärke bei ausreichender Datenverfügbarkeit ex-post evaluiert werden.

5 Anhang: Beschreibung der ASTRA-Modellierung

Das ASTRA-Modell integriert verschiedene Module zu einem System-Modell, welches relevante Wechselwirkungen berücksichtigt. Die Module beschreiben die Entwicklung der Straßenfahrzeugflotten, der Nachfrage im Personen- und Güterverkehr, der Energieverbräuche und Umwelteffekte, sowie der Infrastrukturbedarfe für alternative Antriebsarten und Kraftstoffe. Als wichtige Treiber für das Verkehrssystem sind die Bevölkerung und die Gesamtwirtschaft ebenfalls modelliert (siehe Abbildung 24).

Bevölkerungsentwicklung, Fahrzeugflotten und Verkehrsnachfrage in ASTRA sind anhand verschiedener Quellen kalibriert (z. B. Destatis Bevölkerungsstatistik und -vorausberechnung, Verkehr in Zahlen (BMDV) und Kraftfahrtbundesamt (KBA)). Im Allgemeinen ist das in der Referenz berücksichtigte Instrumentenprogramm konsistent mit der jeweils aktuellen Fassung des nationalen Projektionsberichtes (BMUV).³



Quelle: M-Five

Abbildung 24 Überblick über das System-Modell ASTRA

5.1 Das 4-Stufen Verkehrsmodell

Der Modellierung des Personenverkehrs liegt die Logik des Vier-Stufen-Modells zugrunde: Zunächst erfolgt die Verkehrserzeugung, danach die Verkehrsverteilung (Zielwahl), anschließend die Verkehrsmittelwahl (Modal Split) und zum Schluss die Verkehrsumlegung. In der Verkehrserzeugung wird das Verkehrsaufkommen unabhängig von der damit einhergehenden Ortsveränderung bestimmt. Hierbei wird in nahezu allen Verkehrssimulationsmodellen auf die Erkenntnisse aus Mobilitätsumfragen zurückgegriffen, um anhand der Wegeraten bestimmter verhaltenshomogener Gruppen und der Entwicklung der einzelnen Gruppen das Verkehrsaufkommen abzuleiten. Das

³ Eine vertiefte Beschreibung des Modell-Ansatzes findet sich zusammen mit der Beschreibung des hier genutzten Referenzszenarios (REF-2020) in Schade et al. (2022).

Ergebnis der Verkehrserzeugung, das Verkehrsaufkommen, ist damit die gesamte Anzahl der Wege oder Fahrten, die von einer räumlichen Zone von bestimmten Bevölkerungsgruppen für verschiedene Wegezwecke pro Jahr bzw. pro Tag durchgeführt werden.

In der zweiten Stufe, der Verkehrsverteilung, werden die in Stufe 1 erzeugten Verkehre räumlich verteilt. Hierfür kommen Start-Ziel-Matrizen zum Einsatz, die als Verflechtungsmatrix den Start des Verkehrsstroms und dessen Ziel abbilden. Die resultierende Quelle-Ziel-Matrix der jährlichen Wege wird dabei noch nicht mit durchschnittlichen Distanzen multipliziert, da diese abhängig vom Verkehrsmittel sind, mit dem die Wege zurückgelegt werden. Daher ist das Ergebnis das nach Quelle und Ziel aufgelöste Verkehrsaufkommen. Die meisten Verkehrssimulationsmodelle simulieren die Verteilung entweder mittels Gravitationsansatz oder mit Hilfe von Logit-Funktionen auf dem Prinzip von diskreten Wahlentscheidungen.

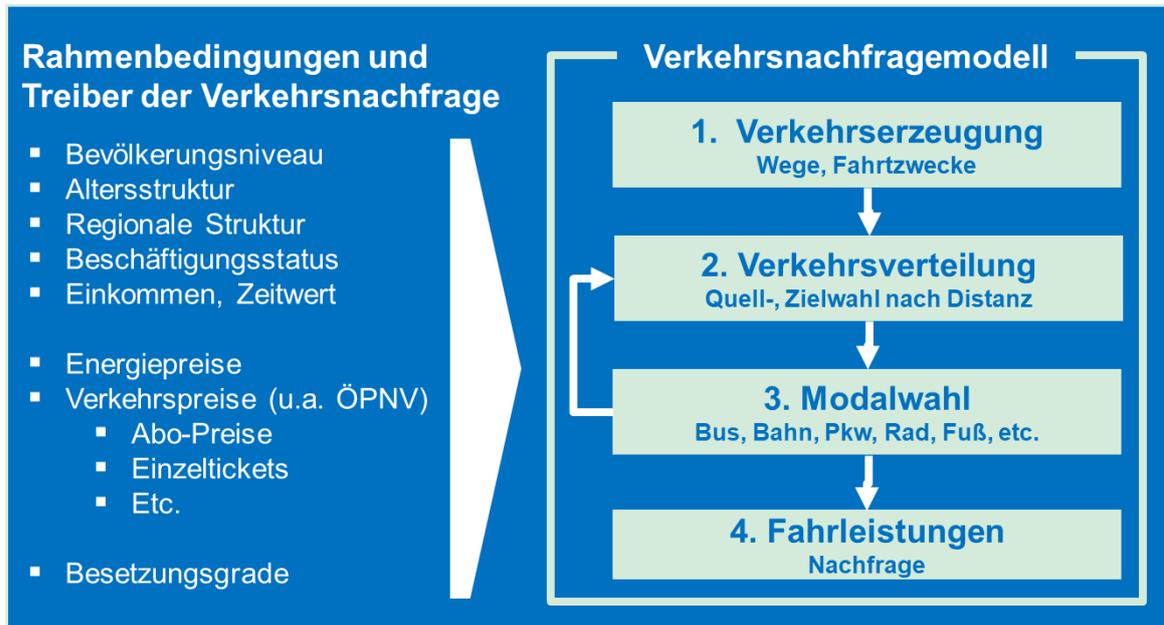
In der dritten Stufe werden die Verkehrsströme auf die für die jeweilige Quell-Ziel Relation zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel verteilt. Für die Verkehrsmittelwahl werden Informationen der Mobilitätsnachfragenden, also sozio-demografische wie auch mobilitätsspezifische (bspw. der Autobesitz) Faktoren, ebenso verkehrsmittelspezifische Faktoren, insbesondere Zeit (Fahrt-, Zugangs-, Abgangs- und Wartezeiten) und Kosten, berücksichtigt. Darüber hinaus spielen nicht bzw. schwer quantifizierbare Faktoren wie die Zuverlässigkeit, die Sicherheit sowie der Komfort eine Rolle. Das Resultat der Verkehrsaufteilung ist der Modal Split, der den Anteil der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen angibt. Als State-of-the-Art werden dabei in den meisten Verkehrssimulationsmodellen die Prinzipien von diskreten Wahlentscheidungen mittels Logit Funktionen verwendet. Einfachere Modelle verwenden dafür Elastizitäten-Ansätze.

Aus dem Verkehrsaufkommen lassen sich nach dieser Stufe

- die Verkehrsleistung in Personenkilometern anhand der verkehrsmittelspezifischen durchschnittlichen Distanzen und
- die Fahrleistung in Fahrzeugkilometern durch die Berücksichtigung der verkehrsmittelspezifischen Besetzungsgrade ermitteln.

Im vierten Schritt, der Verkehrsumlegung, werden die Verkehrsströme aus Stufe 2 mit den dazugehörigen Verkehrsmitteln aus Stufe 3 auf die vorhandene Verkehrsinfrastruktur bzw. die Routen umgelegt. So können Aussagen über Belastungen des Verkehrsnetzes getroffen werden. Das Personenverkehrsmodell von ASTRA bildet die ersten drei Stufen des Vier-Stufen-Modells ab und verzichtet auf eine detaillierte Modellierung der letzten Stufe, die Verkehrsumlegung. Dies geschieht aufgrund der Fokussierung des systemdynamischen Ansatzes auf Verkehrsleistung und Verkehrsmittelwahl, um daran anschließend makroökonomische wie auch Umwelt-Effekte des Verkehrs zu berechnen. An vierter Stelle erfolgt daher in diesem Fall die Ermittlung der Fahrleistungen auf Basis der Besetzungsgrade, Verkehrsverteilung und der Modalaufteilung, um damit Aussagen über die Fahrzeugkilometer der einzelnen Verkehrsmittel treffen zu können. Abbildung 25 zeigt

den grundsätzlichen Aufbau des Personenverkehr-Moduls in ASTRA in den vier oben beschriebenen Stufen.



Quelle: M-Five, Fraunhofer ISI.

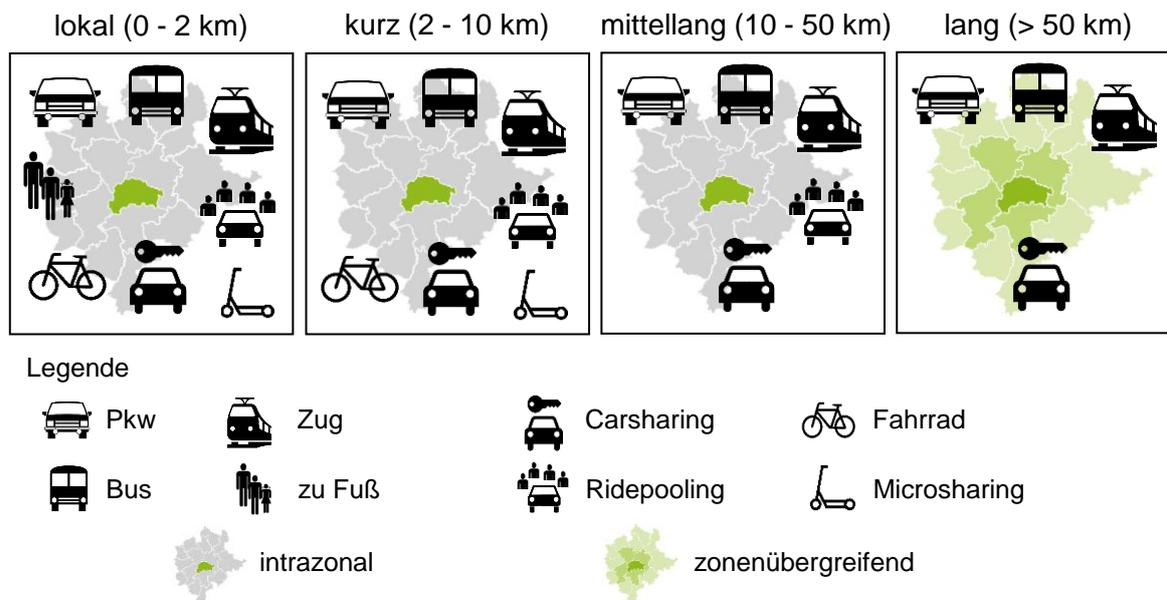
Abbildung 25 Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA

5.2 Die Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Die Verkehrserzeugung erfolgt im Personenverkehrsmodell von ASTRA anhand von Daten aus dem Mobilitätspanel und der Mobilität in Deutschland (MiD). Unter Berücksichtigung der Entwicklung von verhaltenshomogenen Bevölkerungsgruppen (differenziert nach Alters- und Einkommensgruppen und NUTS2 Zonen) werden auf Basis von Wegeraten (abgeleitet aus der MiD 2017) für vier Wegezwecke ausgehende Wege generiert und um über makroökonomische Entwicklungen induzierte Wege ergänzt. Das Ergebnis von Stufe 1 ist somit die Summe aller Wege in Deutschland.

Unter Verwendung von Start-Ziel-Matrizen aus der Verflechtungsprognose werden die in Stufe 1 generierten Wege räumlich auf Ziele in der gleichen oder anderen NUTS2 Zonen verteilt. Unterschieden wird hier nach interzonalen und intrazonalen Wegen. Interzonal meint Wege mit verschiedenen NUTS2-Zonen als Start und Ziel. Intrazonale Wege finden innerhalb einer NUTS2-Zone statt. Diese werden weiter differenziert in lokale (0-2 km), kurze (2-10 km) und mittellange (über 10 km) Wege. Alle Wege werden danach unterschieden, ob sie in städtischem oder ländlichem Gebiet (Flächennutzung) stattfinden und welcher Wegezweck dem Weg zugrunde liegt. Unterschieden wird in Arbeits-, Dienst-, Privat- (bspw. Einkaufen oder Erledigungen) und Freizeitwege. Des Weiteren wird die Einkommensverteilung der Verkehrsnachfragenden berücksichtigt. Für diese Verkehrsverteilung werden, wie in vielen Logit-Funktionen, die Prinzipien von diskreten Wahlerentscheidungen angewandt. Dabei gehen sowohl Fahrzeiten als auch Fahrtkosten in die spezifische Nutzenfunktion im Logit über sogenannte durchschnittliche generalisierte

Kosten ein. Je höher Fahrtkosten und Fahrzeiten sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für eine solche Quell-Ziel Verbindung. Fahrzeiten werden dabei monetarisiert mit Hilfe von wegezweck-spezifischen Zeitwerten. Das Ergebnis von Stufe 2 ist somit die Anzahl der Wege nach Quelle und Ziel (innerhalb oder zwischen NUTS-II-Zonen sowie städtisch oder ländlich) und dem Wegezweck. Änderungen bei Fahrtkosten oder Fahrzeiten durch klimapolitische Maßnahmen oder einen Ausbau der Infrastruktur haben somit bereits einen Einfluss auf die Zielwahl.



Quelle: M-Five, ASTRA.

Abbildung 26 Distanzklassen und Verkehrsmittel in ASTRA

Die Quelle-Ziel-Matrizen werden in Stufe 3 genutzt, um die Verkehrsmittelwahl zu modellieren. Für diese Schätzung werden ebenfalls Logit-Funktionen genutzt, die aus einer Reihe an Einflussfaktoren und der in Stufe 2 ermittelten Wege eine Zuteilung von Verkehrsmitteln auf diese Wege vorzunehmen. Die Logit-Funktion ist dabei wie folgt definiert:

$$\pi_i = \frac{e^{-\beta_{0ij} + \beta_{ij} * x_{ijk}}}{\sum_i e^{-\beta_{0ij} + \beta_{ij} * x_{ijk}}}$$

Mit:	π	= Modalwahlwahrscheinlichkeit
	β_0	= Konstante
	β_{ij}	= Logit-Koeffizient
	x	= Generalisierte Kosten
	i	= Modus [Auto; Bus; Zug; Rad; Fuß; Carsharing; Ridepooling; Microsharing]
	j	= Flächennutzung [städtisch; ländlich]
	k	= Wegezweck [Arbeit; Dienst; Privat; Freizeit].

Wie die Funktion zeigt, werden also für jeden Modus die spezifischen Charakteristika (β_{0ij} und β_{ij}) durch die Summe aller Modi dividiert, um so in jedem Fall in Summe aller Modi eine Modalwahrscheinlichkeit von 1 zu erhalten. Der Koeffizient β_{ij} wird dabei mit den Modi-, Flächennutzungs- sowie wegezweck-spezifischen generalisierten Kosten x_{ijk} multipliziert. Die generalisierten Kosten bilden sowohl die monetären wie auch die zeitlichen Kosten der entsprechenden Modusnutzung ab. Die monetären Kosten fassen Investitionsentscheidungen (bspw. Kauf privater PKW) und Betriebskosten (bspw. Stromkosten für batterieelektrische Fahrzeuge, Steuern usw.) zusammen. Für die drei geteilten Modi: Carsharing, Ridepooling und Microsharing (Bike- und E-Scootersharing), werden erhobene Realdaten der jeweiligen Anbieter zu Grunde gelegt, um die Kosten je km oder je Stunde abbilden zu können. Auch hier werden Investitionskosten im Sinne von etwaigen Mitgliedsbeiträgen o. Ä. sowie Betriebskosten, also der Kosten je Fahrt, berücksichtigt. Daraus ergeben sich Kosten je Modus pro Personenkilometer (PKM). Die zeitlichen Kosten werden über die Reisezeit und die damit verbundenen Zeitkosten (monetarisiert mit dem äquivalenten Zeitwert, Value of Time) sowie modus-spezifischen Zeitkosten (bspw. Zugangszeit bei geteilten Modi und Wartezeit bei ÖPNV) berechnet. Der Value of Time wird ausgehend von einem empirischen Basiswert je Modus und je Wegezweck und einem Wachstumsfaktor über die Zeit berechnet. Dieser Wachstumsfaktor ist an die Entwicklung des BIP geknüpft, um Einkommensentwicklungen der Bevölkerung zu berücksichtigen.

Die Konstante β_0 integriert all jene Faktoren, die im Modellkontext aufgrund von Komplexitätsgründen nicht abgebildet werden können oder gemeinhin als „weiche“ Faktoren bezeichnet werden. Diese können klare Verkehrsmittelpräferenzen der Personen sein (bspw. monomodale Radfahrende) oder anderweitige Faktoren wie bspw. Subjektive Vorstellungen von Zuverlässigkeit, Sicherheit oder Komfort. Zuverlässigkeit und Komfort sind beispielweise wichtige Faktoren für die Entscheidung für eine Bahnfahrt. β_0 wird für die Schiene im Gegensatz zu anderen Verkehrsmitteln im Verkehrsmittelwahlmodul

in ASTRA nicht als Konstante angesehen, sondern entwickelt sich über die Zeit anhand von Änderungen im Service und der Zuverlässigkeit der Bahn, weil die positiven Entwicklungen bei der Entwicklung der Fahrgastzahlen der Bahn von 1995 bis 2019 nicht alleine mit den Faktoren Reisezeit und Reisekosten erklärbar sind.

Während die privaten PKW in einem endogenen Flottenmodell errechnet werden, ist dies aufgrund der immer noch jungen Marktentwicklung der geteilten Modi nicht möglich. Daher wird für Carsharing, Ridepooling und Microsharing der Ansatz über exogene Angebotsdaten der Anbieter in den jeweiligen NUTS-II-Zonen genutzt. Dies bedeutet, dass für die drei geteilten Modi Daten über die Fahrzeuganzahl vorliegen und sich somit eine Angebotsdichte errechnen lässt. Diese Angebotsdichte wird in Zu- und Abgangszeiten zu den jeweiligen geteilten Fahrzeugen der Dienste übersetzt und ist somit ein zusätzlicher Zeitaufwand für die Verkehrsnachfragenden. Die Angebotsdichte entwickelt sich im Zeitverlauf positiv mit zum Ende des Betrachtungszeitraums sinkenden Wachstumsraten, um Marktsättigungseffekte zu berücksichtigen. In Summe ergibt sich somit als Ergebnis der Logit-Funktionen eine Verteilung von Wegen auf die acht Verkehrsmittel in bzw. zwischen den NUTS-II-Zonen je Flächennutzung und Wegezweck. In Summe ergibt sich damit aus Stufe 3 des Modellierungsansatzes der Modal-Split auf Wegebene, jeweils unterteilt in die genannten Sub-Kategorien.

Im vierten und letzten Schritt der Modellierung des Personenverkehrs in ASTRA werden die in Stufe 3 ermittelten Personenkilometer in Fahrzeugkilometer (Fzg.-km) überführt. Dies geschieht unter Verwendung von Besetzungsgraden je Verkehrsmittel (siehe Tabelle 34), Distanz und Wegezweck. Diese Fahrzeugkilometer fließen im Weiteren in die Umweltbewertung des entstandenen Verkehrs ein.

5.3 Die Modellierung des Pkw-Bestands

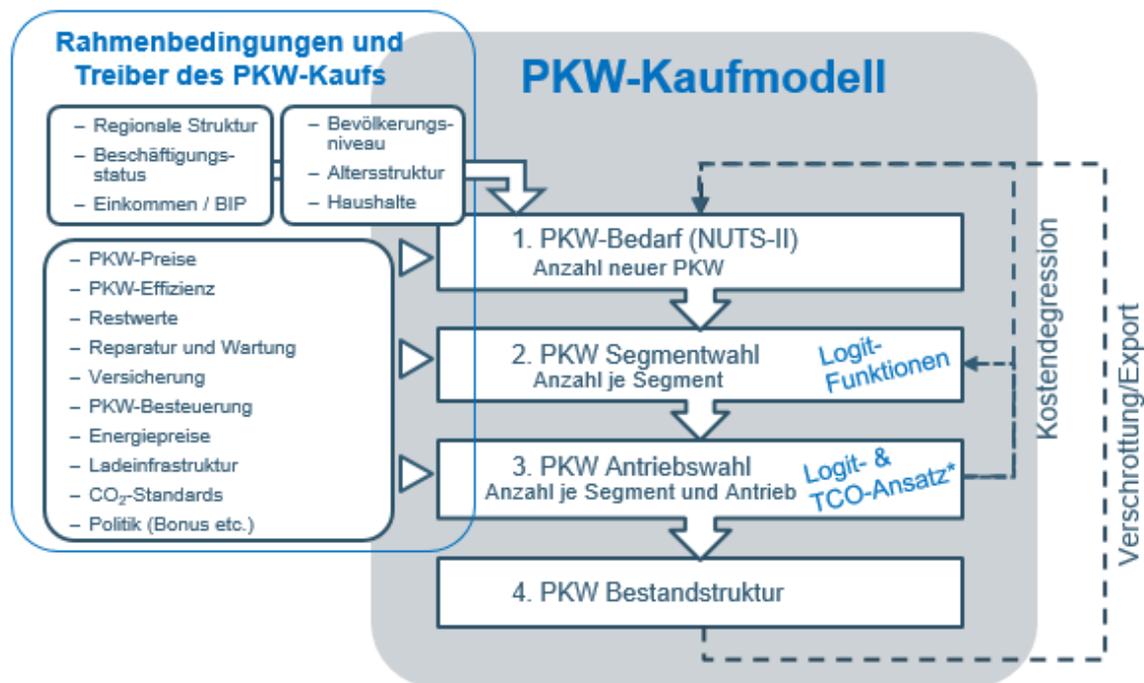
Die Zusammensetzung der Pkw-Flotte wird auf der Grundlage eines technologiedifferenzierten Kohortenmodells berechnet, das sowohl die Altersstruktur als auch die Diffusion neuer Antriebs-Technologien in die Fahrzeugflotten detailliert abbilden kann. Das Fahrzeugmodell betrachtet insgesamt 25 Alterskohorten. Es unterscheidet sieben Fahrzeugsegmente (Mini, Klein, Kompakt-, Mittel-, Oberklasse, Offroad, Van) und acht Antriebsarten: Benzin, Diesel, komprimiertes Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG), Hybride (HEV, Pkw mit Benzin- oder Dieselantrieb, die in der Lage sind elektrisch anzufahren bzw. zu unterstützen, aber über keinen Stecker zur externen Nachladung verfügen), batterieelektrische Pkw, Plug-in-Hybride mit der Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektroantrieb mit externer Aufladung (PHEV)⁴ und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV). Das Pkw-Flottenmodul gliedert sich in die Modellierung der Neuzulassungen anhand der Kaufentscheidungsfunktion (siehe Abbildung 27) und die Bestandsmodellierung (siehe Abbildung 28).

⁴ Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, der nur dem Aufladen der Batterie dient (d.h. Range-Extender), sind ebenfalls der Kategorie PHEV zugeordnet.

Die Nachfrage nach Neuwagen (Abbildung 27) hängt von der Struktur der Fahrzeugflotte ab, von der demografischen Entwicklung sowie insbesondere auch von der ökonomischen Entwicklung. Beim Pkw-Kauf stehen gewerbliche und private Käufer:innen vor der Entscheidung, ein Segment und eine Antriebsart für ihr neues Fahrzeug zu wählen. Diese Entscheidung wird für verschiedene Käufergruppen unterschiedlich getroffen. Eine Gruppe entscheidet rein rational nach ökonomischem Kalkül und wählt anhand der Gesamtbetriebskosten (TCO, Total cost of ownership) das jeweils für ihre Nutzungszwecke günstigste Fahrzeug (TCO-Ansatz). Eine zweite Gruppe entscheidet anhand ihrer Präferenzen. Dabei werden neben der TCO auch weitere Einflussfaktoren berücksichtigt (wie Modellvielfalt, Lademöglichkeiten, Markenvorlieben, ökologische Motive, etc.). Diese Wahlentscheidung wird mittels eines Logit-Ansatzes abgebildet. Die Wirkungsweisen des TCO- und des Logit-Ansatzes unterscheiden sich fundamental:

- **TCO-Ansatz:** In jedem Käufer-Segment (definiert durch Jahresfahrleistung und Käufertyp (Flottenfahrzeug, Dienstwagen, Sonstige)) wird die zu diesem Zeitpunkt TCO-günstigste Antriebsart zu 100 Prozent gekauft. Alle anderen Antriebsarten werden nicht gekauft (0-1 Entscheidung). Im Übergangsjahr wenn die TCO-günstigste Kategorie wechselt (z.B. von Benziner auf BEV), werden die Neuzulassungen zu jeweils 50 Prozent auf die beiden Kategorien verteilt.
- **Logit-Ansatz:** In jedem Käufer-Segment (privat, gewerblich) werden mittels der Logit-Funktion die Wahrscheinlichkeiten berechnet eine bestimmte Antriebsart zu kaufen und die Anzahl der jeweils gekauften Antriebsarten wird durch die Wahrscheinlichkeit und die gesamte Pkw-Nachfrage des Segments bestimmt. Im Logit-Ansatz werden z. B. BEV gekauft auch wenn diese nicht die günstigste Lösung darstellen (z. B. in frühen Jahren der BEV-Marktdiffusion), bzw. es werden noch Verbrenner gekauft auch wenn diese bereits deutlich TCO-ungünstiger sind als BEV (z. B. in den späten 2020er Jahren).

Aus der Aggregation der berechneten Neuzulassungen (NZL) des TCO-Ansatzes und des Logit-Ansatzes über alle Käufergruppen ergeben sich im Zeitverlauf die Diffusionspfade der Antriebsarten bzw. aus Sicht der Elektromobilität die Markthochlaufszszenarien für die verschiedenen Technologien.

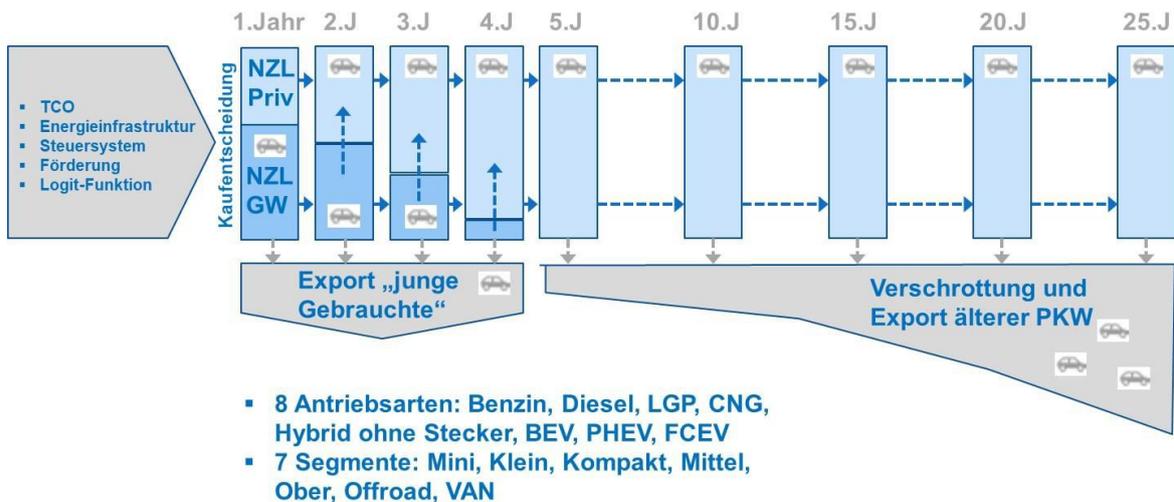


Quelle: M-Five

* TCO-Ansatz nur bei gewerblichen Nutzern

Abbildung 27 Treiber, Modellstufen und Entscheidungsfunktionen des Pkw-Kaufmodells

Die Entwicklung der Pkw-Flotte wird neben der jährlichen Alterung der Alterskohorten durch drei Faktoren beeinflusst (siehe Abbildung 28): (1) durch den Verkauf von gewerblichen Pkw mit einem Fahrzeugalter von unter einem bis vier Jahren an private Halter:innen, (2) durch den Export von jungen gebrauchten Pkw ebenfalls aus den Alterskohorten der ein bis vierjährigen Pkw und (3) durch die Verschrottrate in den verschiedenen Alterskohorten, welche für fünfzehnjährige und ältere Pkw deutlich steigt.



Quelle: M-Five

Abbildung 28 Aufbau des Pkw-Bestand-Modells in ASTRA mit 25 Alterskohorten

Die Technologie- und Altersdifferenzierung der Pkw-Flotte ermöglicht die Verknüpfung mit dem Umweltmodul in ASTRA. Hier werden der Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch und die durch den Verkehr verursachten Emissionen berechnet.

Mit dieser Modellierung ergibt sich die nachfolgende Verteilung der Antriebsarten in Abbildung 29 und Abbildung 30. Im Jahr 2030 beläuft sich der Anteil vollelektrischer PKW auf etwa 14% im Referenzszenario und 31% im Szenario mit ambitioniertem Klimaschutz. Der Pkw-Bestand in Baden-Württemberg ist in Abbildung 20 und folgende dargestellt.

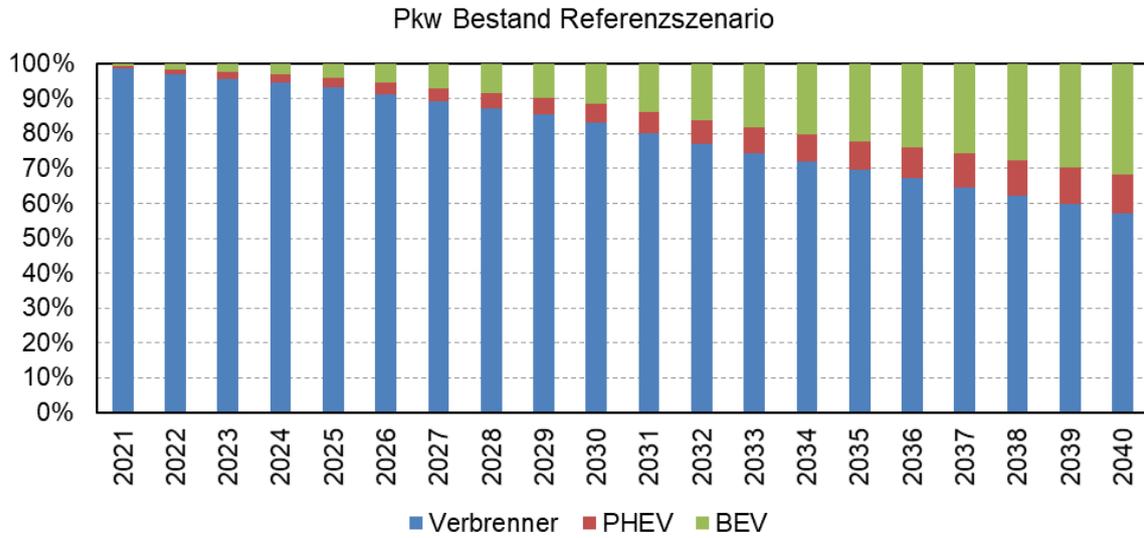


Abbildung 29 Verteilung der Antriebsarten im Referenzszenario

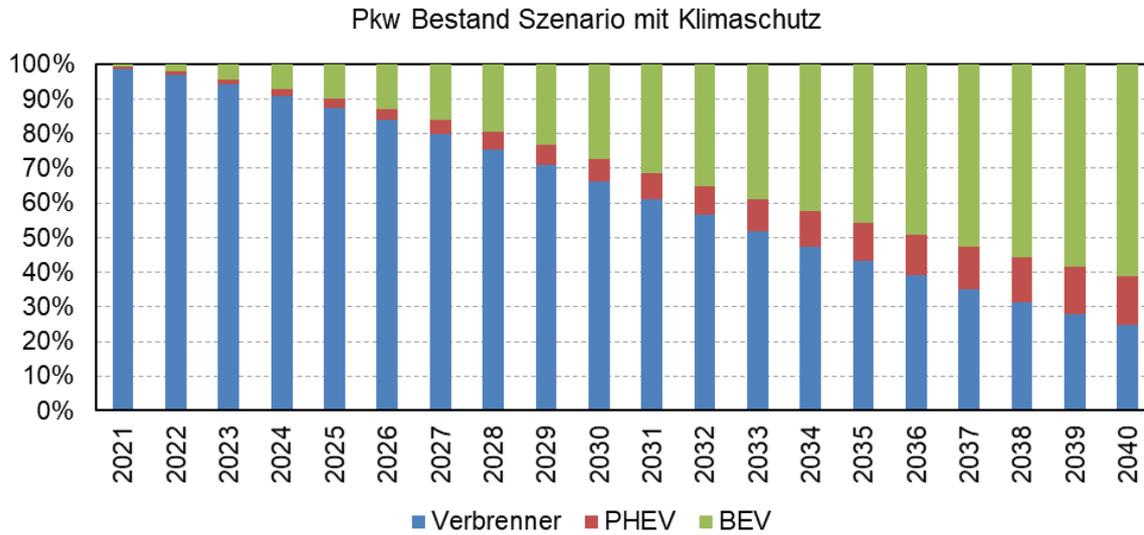


Abbildung 30 Verteilung der Antriebsarten im Szenario mit Klimaschutz

6 Referenzen

- ADAC (2020): *Dauerthema Parken: Kommunen müssen mehr Verantwortung übernehmen!*
<https://www.adac.de/der-adac/regionalclubs/nrw/nrw-kolumne-parken/>
- ADAC (2021): *Das kostet die Miete für Garage und Stellplatz in deutschen Städten.*
<https://www.adac.de/news/miete-garage-kosten/>
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021): *Projektionsbericht der Bundesregierung 2021.*
Abrufbar unter <https://www.bmuv.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2021>
- Friedrich, M., Bawidamann, J., Waßmuth, V., Peter, L. (2023): *Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 368, Bergisch Gladbach.
- Goodwin, P., Dargay, J., Hanly, M. (2004): *Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review.* Transport Reviews, 24(3), 275-292.
- Ifeu (2022): *Kosten von Parkraum.* Ad-hoc Beratung für das Verkehrsministerium Baden-Württemberg. Abrufbar unter https://www.klimaschutz-bewegt.de/wp-content/uploads/02_Kosten_Parkraum_ifeu_Zusammenfassung.pdf
- De Jong, G., Kouwenhoven, M., Geurs, K., Bucci, P., Tuinenga, J. G. (2009): *The impact of fixed and variable costs on household car ownership.* Journal of choice modelling, 2(2), 173-199.
- Kouwenhoven et al. (2022): *Eating the pudding: First results from a new car ownership model for The Netherlands.* Presentation at the ETC 2022.
- Lehner, S., Peer, S. (2019): *The price elasticity of parking: A meta-analysis.* Transportation Research Part A: Policy and Practice, 121, 177-191.
- Ostermeijer, F., Koster, H. R., van Ommeren, J. (2019): *Residential parking costs and car ownership: Implications for parking policy and automated vehicles.* Regional Science and Urban Economics, 77, 276-288.
- Schade W., Stich M., Kleemann M., Berthold D., Scherf C., Krail M., Brauer C., Krauß K., Anstett P., Walther C., Waßmuth V. (2022): *Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020).* Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Karlsruhe.
- Vortisch, P., Waßmuth, V. (2007): *Validate – A Nationwide Dynamic Travel Demand Model for Germany.* In: Proceedings of 11th TRB National Transportation Planning Application Conference” Daytona Beach 2007.
- Widmer (2004): *Einfluss von Änderungen des Parkierungs-Angebotes auf das Verkehrsverhalten.* Forschungsauftrag VSS 1997/46 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).