

# FAT 296

Auswirkungen des teil-  
und hochautomatisierten  
Fahrens auf die Kapazität der  
Fernstraßeninfrastruktur

$\alpha$

$\Phi$

# **Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur**

**Technische Universität München (TUM)  
Lehrstuhl für Verkehrstechnik (TUM-VT)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch**

M.Sc. Sabine Krause

M.Sc. Nassim Motamedidehkordi

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Silja Hoffmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Instituts für Verkehrswesen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch**

Dipl.-Ing. Martin Hartmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Aufgabenstellung und Methodik.....</i>	1
1.2	<i>Struktur des Berichts .....</i>	3
<b>2</b>	<b>Rahmenbedingungen .....</b>	<b>5</b>
2.1	<i>Eigenschaften der automatisierten Fahrzeuge .....</i>	5
2.1.1	<i>Automatisierungsstufen .....</i>	5
2.1.2	<i>Stand der Technik automatisierter Fahrzeuge .....</i>	6
2.1.3	<i>Eigenschaften und Modellierung der automatisierten Fahrfunktionen.....</i>	7
2.2	<i>Straßennetz und Netzelemente.....</i>	22
2.2.1	<i>Eigenschaften des Straßennetzmodells VALIDATE .....</i>	22
2.2.2	<i>Zuordnung der HBS-Netzelemente.....</i>	25
<b>3</b>	<b>Flotten-Modell .....</b>	<b>30</b>
3.1	<i>Methodik.....</i>	30
3.2	<i>Altersverteilung der Fahrzeugflotte .....</i>	32
3.2.1	<i>Pkw-Flotte.....</i>	32
3.2.2	<i>Lkw-Flotte .....</i>	35
3.3	<i>Verfügbarkeit von HAF in Neufahrzeugen .....</i>	41
3.3.1	<i>Pkw-Flotte.....</i>	42
3.3.2	<i>Lkw-Flotte .....</i>	46
3.4	<i>Nutzungsprofile.....</i>	48
3.4.1	<i>Pkw-Nutzung in Deutschland.....</i>	48
3.4.2	<i>Zuordnung der automatisierten Fahrzeuge zur MOP-Stichprobe .....</i>	49
3.4.3	<i>Pkw-Nutzung auf dem Fernstraßennetz .....</i>	52
<b>4</b>	<b>Simulationsexperiment .....</b>	<b>54</b>
4.1	<i>Untersuchungsszenarien .....</i>	54
4.1.1	<i>Nutzungsgrade.....</i>	54
4.1.2	<i>Belastungsverhältnisse .....</i>	56
4.2	<i>Fahrzeugtypen innerhalb der Simulation .....</i>	57
4.3	<i>Verkehrsnachfrage .....</i>	57
4.4	<i>Anzahl der Simulationsdurchläufe .....</i>	58
<b>5</b>	<b>Vorgehen bei der Ermittlung der Kapazitäten.....</b>	<b>60</b>

<b>6</b>	<b>Ergebnisse aus der Simulation</b>	<b>62</b>
6.1	<i>Einfahrten</i>	62
6.2	<i>Ausfahrten</i>	64
6.3	<i>Verflechtungen</i>	66
6.4	<i>Streckenabschnitte</i>	67
6.5	<i>Weitere Ergebnisse</i>	68
6.5.1	Extremszenarien	68
6.5.2	Mischszenarien	69
6.5.3	Fahrzeiten	70
6.5.4	Veränderte Lkw-Geschwindigkeitsbeschränkungen	71
6.6	<i>Fazit</i>	72
<b>7</b>	<b>Hochrechnung der Simulationsergebnisse</b>	<b>74</b>
7.1	<i>Methodik der Hochrechnung</i>	74
7.1.1	Ergebnisse der Jahresszenarien	75
7.1.2	Szenario „Nachfragewachstum“	80
<b>8</b>	<b>Bewertung nach BVWP-Methodik</b>	<b>82</b>
8.1	<i>Ausgewählte Komponente der Nutzen-Kosten-Analyse</i>	82
8.1.1	Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)	82
8.1.2	Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ)	85
8.1.3	Veränderung der Betriebskosten (NB)	85
8.1.4	Nicht betrachtete Komponente der Nutzen-Kosten-Analyse	86
8.2	<i>Ergebnisse der Bewertung</i>	87
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>90</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>93</b>
<b>12</b>	<b>Anhang I</b>	<b>97</b>
<b>13</b>	<b>Anhang II</b>	<b>124</b>
<b>14</b>	<b>Anhang III</b>	<b>151</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung und Methodik

Teil- und Hochautomatisiertes Fahren wird unseren Straßenverkehr in der Zukunft beeinflussen. Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, zu ermitteln, welche positiven oder negativen Folgen die aufkommende Technik des automatisierten Fahrens auf die Kapazität des deutschen Fernstraßennetzes hat und wie sich diese Effekte über die Zeit entwickeln werden. Der vorliegende Bericht gibt Vorgehen, Annahmen und Ergebnisse des Forschungsprojektes wieder.

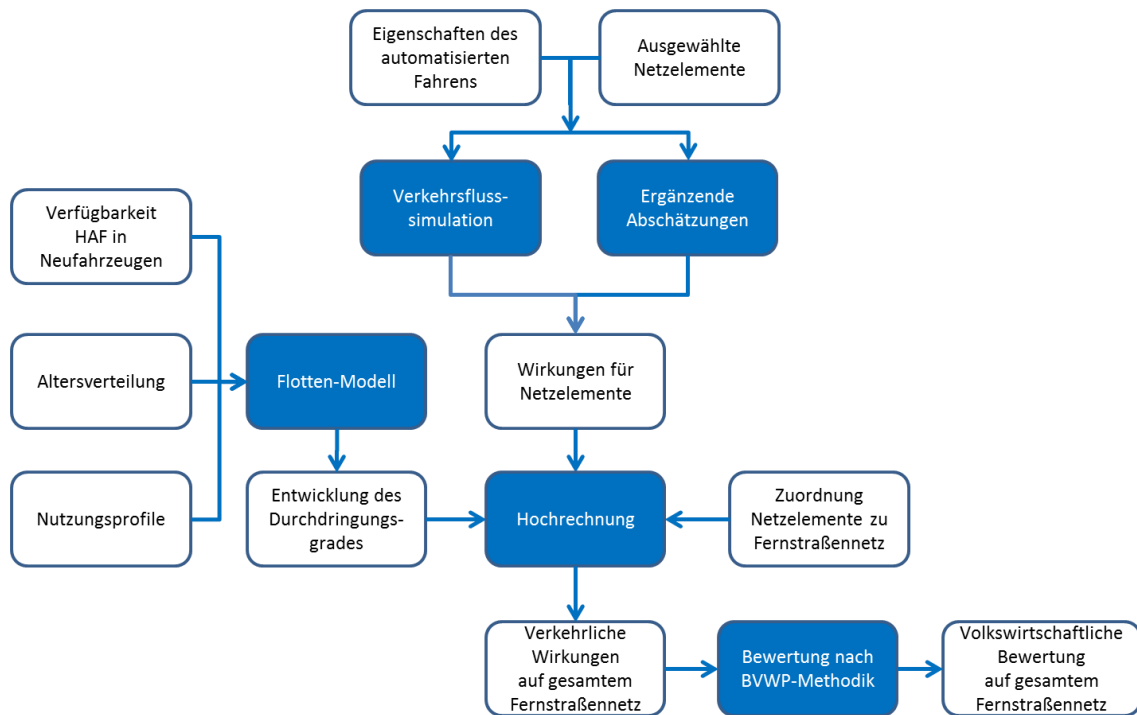
Automatisierung des Verkehrs und dessen Einfluss auf das bestehende Verkehrssystem ist ein komplexes und vielschichtiges Thema. Die Ausschreibung des Forschungsprojekts durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik FAT gibt bereits Hinweise welche der zahlreichen Aspekte dieses Themas vertieft zu betrachten sind und für welche auf Aussagen bestehender Studien zurückgegriffen werden soll.

Es wird im Rahmen dieses Projektes vor allem die Frage behandelt, wie sich teil- und vollautomatisches Fahren bei verschiedenen Durchdringungsraten verkehrstechnisch auf die Straßenkapazität auswirkt und wie sich diese Durchdringungsraten zukünftig entwickeln werden. Die Aussagen zur Kapazität werden anschließend bezogen auf das gesamte deutsche Fernstraßennetz für eine volkswirtschaftliche Bewertung verwendet.

Der methodische Kern liegt in der Bestimmung des verkehrstechnischen Einflusses automatisierten Fahrens auf den Verkehrsfluss und damit die Kapazität. Dies erfolgt durch detaillierte, mikroskopische Untersuchungen an jeweils kleinen Straßennetzelementen. Aus den Ergebnissen für diese Netzelemente werden die Auswirkungen auf das deutsche Fernstraßennetz hochgerechnet und daran schließt die volkswirtschaftliche Bewertung an.

Die Wirkungen auf den Verkehrsfluss hängen von vielen Randbedingungen ab, wie z. B. der Flottenzusammensetzung, der Verkehrsbelastung, von rechtlichen Vorgaben und Annahmen über die Fahrfunktionen. Für diese Randbedingungen werden Szenarien für die Simulation und Hochrechnung entwickelt, die aus technischen und rechtlichen Gegebenheiten und deren erwarteter Entwicklung in der Zukunft abgeleitet werden.

Die einzelnen Arbeitsschritte und Themenbereiche der vorliegenden Studie sind in nachfolgender Abbildung 1 dargestellt:



**Abbildung 1** – Methodik für die Bearbeitung des Forschungsprojektes

Die genannten Arbeitsschritte zur Durchführung der Studie gliedern sich in die folgenden Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 1: Rahmenbedingungen und Szenarien
- Arbeitspaket 2: Wirkungen von automatisiertem Fahren
- Arbeitspaket 3: Hochrechnung und Bewertung.

Ziel des **Arbeitspaketes 1** ist es, die Rahmenbedingungen und Szenarien für die Simulationsstudie sowie für die Hochrechnung festzulegen. Dies beinhaltet neben der Auswahl und Festlegung der *Eigenschaften des automatisierten Fahrens* die *Auswahl von Netzelementen* für die Simulationsuntersuchung.

Ausgehend von der heutigen Situation (weitgehend ohne automatisiertes Fahren) werden verschiedene Szenarien entwickelt, wie sich die Etablierung des automatisierten Fahrens bis hin zum vollständigen automatisierten Fahren auf den Fernstraßen entwickeln könnte. Um den zeitlichen Verlauf der Entwicklung über die Szenarien abzuschätzen, werden Annahmen über die *Verfügbarkeit von automatisiertem und teilautomatisiertem Fahren in Neufahrzeugen* gemacht. Die Entwicklung der Flottenzusammensetzung leitet sich aus der *Altersverteilung* und den *Nutzungsprofilen* für verschiedene Fahrzeugarten ab.

Im darauffolgenden **Arbeitspaket 2** wird die Simulationsstudie durchgeführt und es werden die *Wirkungen auf die Netzelemente* (die Veränderungen der Kapazitäten für die jeweiligen Untersuchungsszenarien) ermittelt und für die anschließende Hochrechnung ausgewertet.

Das **Arbeitspaket 3** beinhaltet die *Hochrechnung* der Ergebnisse aus der Simulationsstudie auf das *gesamte Bundesautobahnnetz* sowie die daraus aufbauende *volkswirtschaftliche Bewertung nach der Methodik des Bundesverkehrswegeplans (BVWP)*.

## 1.2 Struktur des Berichts

Dieser Bericht beschreibt die Arbeiten des Lehrstuhls für Verkehrstechnik an der Technischen Universität München sowie des Instituts für Verkehrswesen am Karlsruher Institut für Technologie. Der Bericht ist folgendermaßen strukturiert:

In Kapitel 2 werden die festgelegten Rahmenbedingungen für die Simulationsstudie und die Hochrechnung beschrieben, es wird erläutert, warum die Randbedingungen so gewählt werden. Dies beinhaltet z.B. wie die fahrzeugseitigen Eigenschaften der teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge innerhalb dieses Projektes beschrieben werden und wie das betrachtete Fernstraßennetz in Deutschland den im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [1] definierten Netzelementen zugeordnet wird. Dies erlaubt eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die jeweiligen Netzelemente und deren spätere Hochrechnung auf das gesamte Bundesautobahnnetz.

In Kapitel 3 wird ein Ansatz zur Prognose der Pkw- und Lkw-Fahrzeugflotte und der Markteinführung von Assistenzsystemen und deren Durchdringung über die Zeit vorgestellt. Hierbei wird sowohl auf die Altersverteilung der Fahrzeuge als auch auf die Verfügbarkeit von hochautomatisiertem Fahren in Neufahrzeugen und die Nutzungsprofile eingegangen.

Das Kapitel 4 erläutert die Simulationsexperimente und geht vor allem auf die Szenarien ein, die in der Simulationsstudie untersucht werden. Es wird darauf geachtet, dass die Wirksamkeit der einzelnen Systeme vergleichend bewertet werden können und eine Basis für die Hochrechnung auf das gesamte deutsche Fernstraßennetz geschaffen wird. Danach wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der Simulation beschrieben. In Kapitel 5 wird detailliert auf die Ermittlung der Kapazitäten eingegangen.

Das Kapitel 6 gibt die Ergebnisse der Simulationsstudie wieder. Die Wirkungen der teil- und hochautomatisierten Fahrfunktionen auf die verschiedenen Netzelemente werden mit der Kenngröße Kapazität ermittelt. Es werden verschiedene Automatisierungsgrade und Belastungssituationen betrachtet, um eine akkurate Hochrechnung auf das Gesamtnetz zu ermöglichen.

Das Vorgehen und die Resultate aus der Hochrechnung der Simulationsergebnisse werden im Kapitel 7 zusammengefasst. Es werden die Auswirkungen auf die Kapazität der Infrastruktur in Deutschland sowie die betrieblichen Auswirkungen dargestellt und diskutiert. Schließlich werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der Hochrechnung anhand der Methodik des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) volkswirtschaftlich bewertet.

Das Kapitel 9 fasst Methodik und Vorgehen des Projekts sowie die gewonnenen Erkenntnisse zusammen. Dabei werden die Ergebnisse dieser Studie diskutiert und es erfolgt ein Ausblick.



## 2 Rahmenbedingungen

### 2.1 Eigenschaften der automatisierten Fahrzeuge

Innerhalb dieser Studie werden die Wirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur betrachtet. Hierfür ist es nötig, zunächst die Eigenschaften der automatisierten Fahrzeuge zu definieren. Das bedeutet, dass zunächst festgelegt werden muss, welche Formen von Automatisierung konkret untersucht werden sollen und wie diese als Fahrer-Fahrzeug-Verhalten in der Simulation dargestellt werden. Die nachfolgenden Abschnitte beinhalten diese Definitionen.

#### 2.1.1 Automatisierungsstufen

Der Verband der Automobilindustrie (VDA) unterscheidet sechs Automatisierungsgrade von Fahrzeugen. Sie reichen von der Stufe des rein manuellen Fahrens ohne jegliche Automatisierung des Fahrzeuges bis hin zur völligen Automatisierung, in der kein Fahrer mehr in einem Fahrzeug benötigt wird. Es existieren zahlreiche verschiedene Definitionen und Einteilungen von Fahrerassistenzfunktionen in die unterschiedlichen Kategorien. Alle sind sich insofern ähnlich, als dass sie in Stufen aufgebaut sind, in denen das System zunehmend mehr Aufgaben des Fahrens übernimmt und der Fahrer nach und nach weniger Verantwortung übernimmt. Beispielhaft dafür ist im Folgenden die Einteilung des VDA [2] beschrieben, welche in Abbildung 2 dargestellt ist.

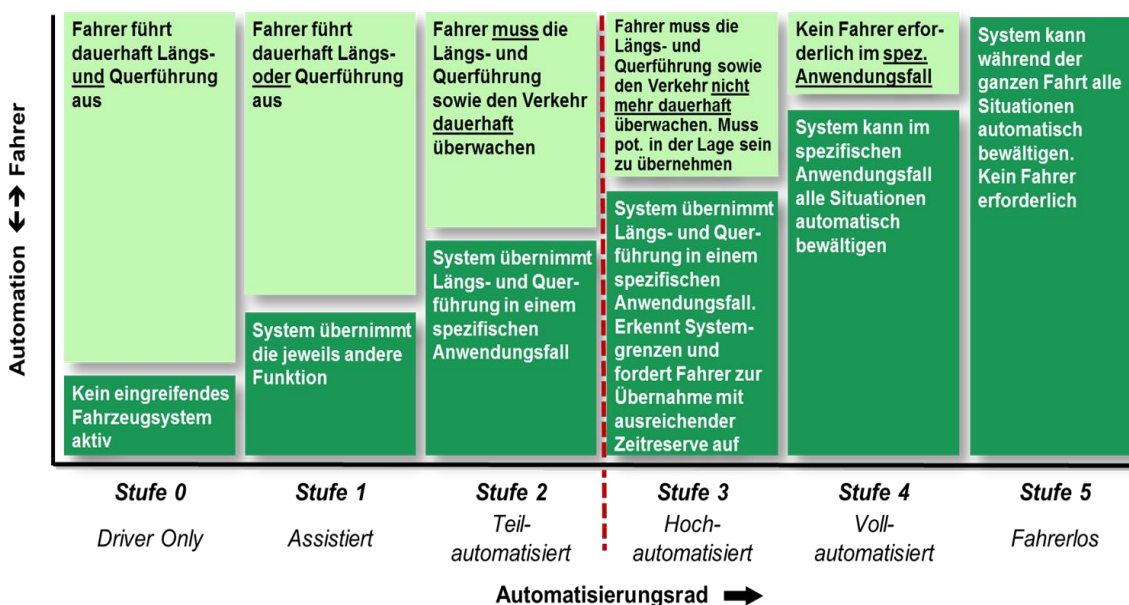


Abbildung 2 - Stufen des automatisierten Fahrens [3]

Die Automatisierungsgrade beginnen bei Stufe Null, die als „Driver Only“ bezeichnet wird. In dieser Stufe wird die komplette Fahraufgabe, also sowohl die Längs- als auch die Querführung von dem Fahrer ausgeführt. Im Fahrzeug sind keine eingreifenden Systeme aktiv, sondern lediglich warnende Systeme. Ausgehend von dieser Stufe Null wird in den folgenden Automatisierungsstufen eine zunehmende Anzahl an Fahraufgaben von Fahrzeugsystemen übernommen.

Systeme der Stufe 1 übernehmen Systeme entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs, der Fahrer führt währenddessen die jeweils andere Fahraufgabe aus. Von Teilautomatisierung wird in der Definition des VDA in der Stufe 2 gesprochen, da der Fahrer nun sowohl die Längs-, als auch die Querführung an das System übergeben kann, dies gilt jedoch bei teilautomatisiertem Fahren nur in gewissen Anwendungsfällen. Der Fahrer muss das Fahrzeug und den Verkehr während der Fahrt stets überwachen und in der Lage sein, die Steuerung des Fahrzeugs wieder zu übernehmen.

In Stufe 3 erkennt das System selbständig die Systemgrenzen, also die Bereiche, in denen die Umgebungsbedingungen nicht mehr dem Funktionsumfang des Assistenzsystems entsprechen. Ist eine solche Grenze erreicht, fordert das Fahrzeug den Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe auf. Der Fahrer muss die Längs- und die Querführung des Fahrzeugs nicht mehr dauerhaft überwachen. Er muss jedoch dazu in der Lage sein, nach Aufforderung durch das System mit einer gewissen Zeitreserve die Fahraufgabe wieder zu übernehmen.

Ab der Stufe 4 kann der Fahrer in spezifischen Anwendungsfällen die komplette Fahraufgabe an das System übergeben. Die Anwendungsfälle sind charakterisiert durch den Straßentyp, den Geschwindigkeitsbereich und die Umfeldbedingungen.

Als letzte Entwicklungsstufe gilt das fahrerlose Fahren, die Stufe 5 der Automatisierung. Hier kann das Fahrzeug auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und unter allen Umfeldbedingungen die Fahraufgabe eigenständig durchführen, auch eine Überwachung des Systems durch den Fahrer ist hier nicht mehr notwendig, es wird in diesem Sinne kein Fahrer mehr an Bord eines Fahrzeugs benötigt.

## **2.1.2 Stand der Technik automatisierter Fahrzeuge**

Innerhalb dieser Studie sollen Funktionen betrachtet werden, die den Automatisierungsstufen zwei und drei (laut Beschreibung in Kapitel 2.1.1) entsprechen. Als teilautomatisierte Funktion werden Funktionen betrachtet, die nur einen Teilumfang der Fahrzeugführung übernehmen. Erste Systeme, die eigenständig die Längsführung des Fahrzeugs übernehmen, sind bereits auf dem Markt erhältlich, wie z.B. die Adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control,

ACC). Es ist eine Weiterentwicklung der Geschwindigkeitsregelung (auch als Tempomat bezeichnet), die die durch den Fahrer eingestellte Geschwindigkeit hält. Das ACC erkennt zusätzlich durch die bordeigene Sensorik im Fahrzeug, ob sich Objekte im Bereich vor dem Fahrzeug befinden und regelt durch Verzögerung den Abstand zu diesen ein. Der Abstand kann ebenfalls aus mehreren vordefinierten Stufen vom Fahrer bestimmt werden. Auch eine Beschleunigung kann systemseitig durchgeführt werden, sobald ausreichend Freiraum vor dem Fahrzeug vorhanden ist. Ebenso existieren Assistenzsysteme der Automatisierungsstufe 1, welche nur die Querregelung des Fahrzeuges übernehmen, um beispielsweise das Fahrzeug innerhalb des Fahrstreifens zu halten. Solch ein System wird als Lane Keeping Assistant bezeichnet und ist ebenfalls bereits in einigen auf dem Markt erhältlichen Fahrzeugen verfügbar.

Eine Weiterentwicklung des ACC ist das sogenannte kooperative ACC (CACC), welches durch Kommunikation zu den Fahrzeugen in der Umgebung mehr Informationen erhält und verarbeiten kann. Somit wird ermöglicht, dass das Regelverhalten mehrerer Fahrzeuge aufeinander abgestimmt werden kann und Abstände verringert werden.

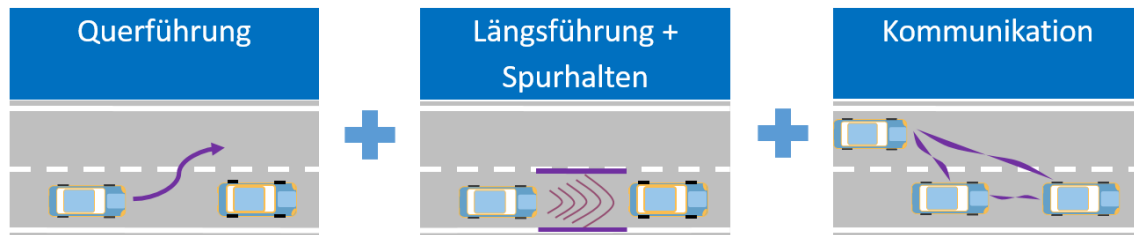
Sobald sowohl die Quer- als auch die Längsführung in einer Funktion angeboten werden, steigt der Grad der Komplexität. Die Quer- und Längsführung müssen innerhalb der Funktion so aufeinander abgestimmt werden, dass sinnvolle Trajektorien entstehen. Sobald der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen muss, wird von hochautomatisiertem Fahren gesprochen.

Eine weitere Stufe ist erreicht, wenn Funktionen, die in die Längs- und Querverführung eingreifen, mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur kommunizieren können. Somit können die Fahrstrategien aufeinander abgestimmt werden. Dies ermöglicht auch, dass der Fahrer das System über längere Zeiträume nicht überwachen muss.

### **2.1.3 Eigenschaften und Modellierung der automatisierten Fahrfunktionen**

Für die Simulationsstudie wird basierend auf mit Experten abgestimmten Hypothesen zu den künftigen Eigenschaften des teil- und hochautomatisierten Fahrens ein generisches Modell entwickelt. Das Modell enthält die verschiedenen Stufen der Automatisierung (teil- und hochautomatisiert) und innerhalb dieser Stufen unterschiedliche Ausprägungen.

Die Systeme unterscheiden sich nach der Technologie, die im Fahrzeug vorhanden sein muss, sowie der Fahraufgabe, die das Fahrzeug übernimmt. Abbildung 3 illustriert die drei Komponenten, die einer automatisierten Fahrfunktionen zur Verfügung stehen können. Je nachdem, welche dieser vorhanden sind, ergibt sich eine unterschiedliche Funktion bzw. Ausprägung.



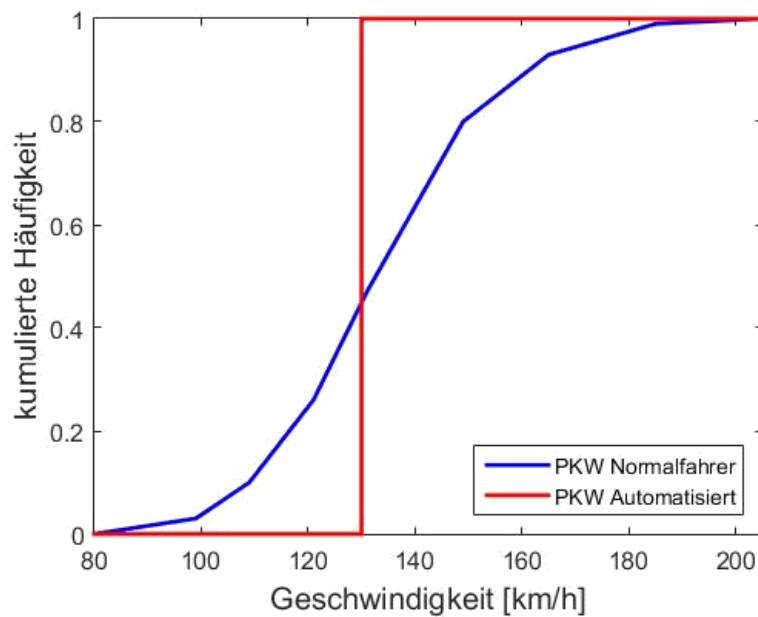
**Abbildung 3** – Komponenten der automatisierten Fahrfunktionen

Als teilautomatisierte Fahrfunktion (TAF) wird in dieser Studie ein Verhalten simuliert, in dem das System die Längsführung des Fahrzeugs übernimmt, die Querführung jedoch nur zu einem gewissen Grad, Fahrstreifenwechsel werden vom menschlichen Fahrer ausgeführt. Als hochautomatisiert (HAF) werden solche Systeme bezeichnet, die einen Fahrstreifenwechsel ohne Eingriff des Fahrers durchführen können. Eine weitere Stufe des Systems erhält außerdem zusätzliche Informationen durch Kommunikation mit ebenfalls ausgestatteten umgebenden Fahrzeugen. Dadurch können die Lücken zwischen diesen kommunizierenden hochautomatisierten Fahrzeugen (KHAF) sehr gering gehalten werden.

Für das mit einer Längsregelung ausgestattete Fahrzeug werden folgende Annahmen getroffen:

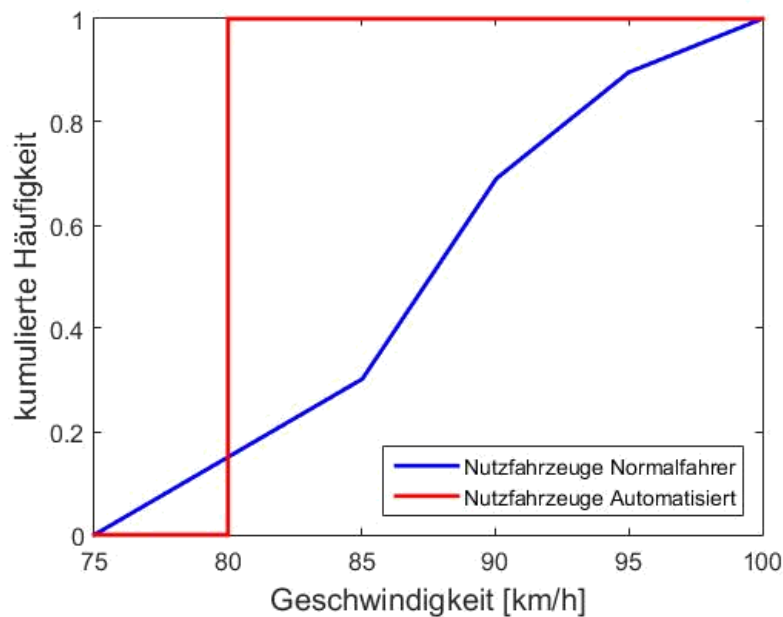
- Automatisierte Fahrzeuge halten sich an die Richtgeschwindigkeit bzw. die zulässige Höchstgeschwindigkeit.
- In der Folgefahrt halten automatisierte Fahrzeuge einen Abstand zum Vorderfahrzeug, der den rechtlichen Vorgaben entspricht.
- Wenn automatisierte Fahrzeuge untereinander kommunizieren können, können kleinere Lücken in der Folgefahrt realisiert werden.

Für die ausgestatteten Fahrzeuge wird angenommen, dass die Geschwindigkeit in der Freifahrt der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h entspricht. Bei den menschlichen Fahrern gibt es eine Wunschgeschwindigkeit für jeden einzelnen Fahrer und damit Unterschiede zwischen den Fahrern. Es ergibt sich eine Verteilung, die in Abbildung 4 ersichtlich ist. In der Verkehrssimulation wurden keine Netzelemente mit Beschränkungen der zulässigen Geschwindigkeit (Tempolimits) simuliert.



**Abbildung 4** – kumulierte Häufigkeiten der Geschwindigkeiten der Normalfahrer und hochautomatisierten Fahrzeuge in der Freifahrt

Ähnliches gilt auch für Lkw, wobei die automatisierten Fahrzeuge in der Freifahrt exakt die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80km/h fahren. Die kumulierten Häufigkeiten der Geschwindigkeiten der realen Fahrer finden sich in Abbildung 5. Es wird ersichtlich, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten der automatisiert fahrenden Lkw deutlich unter denen der Normalfahrer befindet. Beide Verteilungen der Normalfahrer (Pkw und Lkw) stammen aus den Kalibrierungen, die innerhalb des Projektes FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ durchgeführt wurden, das durch die Bundesanstalt für Straßenwesen gefördert wurde [4].



**Abbildung 5** – kumulierte Häufigkeiten der Geschwindigkeiten der Normalfahrer und automatisierten Nutzfahrzeuge in der Freifahrt

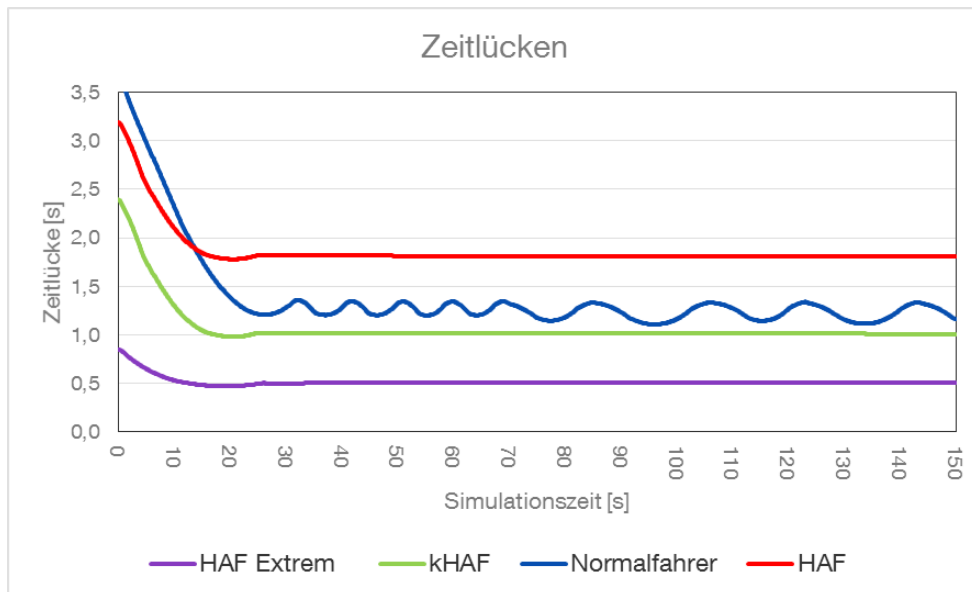
Für das Fahrverhalten in der Folgefahrt wird davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge den gewünschten Abstand zu ihrem Vorderfahrzeug sehr präzise und konstant einhalten. Sie unterscheiden sich insofern von menschlichen Fahrern, als dass sie kaum Variation bei diesem Verhalten aufweisen. Das heißt, dass die Systeme die definierte Sollzeitlücke zum Vorderfahrzeug exakt einhalten, während der menschliche Fahrer um einen Wert pendelt, da es ihm nicht möglich ist, den Abstand so präzise zu regeln wie ein technisches System. Besonders deutlich ist dieser Unterschied in den Zeitlückenverläufen erkenntlich. In Abbildung 6 ist jeweils ein Beispielverlauf der Zeitlücke eines Fahrzeugs abgebildet, das sich in der Folgefahrt zu einem Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit befindet. In Blau dargestellt ist der Verlauf für einen Normalfahrer, dieser weist im Gegensatz zu den anderen dargestellten Verläufen der automatisierten Fahrzeuge eine starke Variation im Zeitlückenverlauf auf. Die automatisierten Fahrzeuge halten je nach Ausstattung und Situation eine unterschiedlich große Lücke zum Vorderfahrzeug. Es wer-

den verschiedene Varianten betrachtet; das Hochautomatisierte Fahrzeug (HAF) hält eine Zeitlücke von mindestens 1,8 Sekunden, die niemals unterhalb von 0,9 Sekunden<sup>1</sup> fallen darf, um so eine Ordnungswidrigkeit gemäß Bußgeldkatalog zu vermeiden. Eine geringe Zeitlücke wird für kommunizierende Hochautomatisierte Fahrzeuge (kHAF) ermöglicht, sobald dies einem anderen kommunizierenden Fahrzeug folgt. Da sich Systeme solcher Art noch nicht auf dem Markt befinden, kann zur Größe der Zeitlücken zwischen so ausgestatteten Fahrzeugen nur eine Annahme getroffen werden. Die in Abbildung 6 für HAF und kHAF dargestellten Datenreihen repräsentieren diese Annahmen.

Ein Sonderfall des Abstandsverhaltens zwischen automatisierten Fahrzeugen ist der sogenannte Kolonnenassistent für Nutzfahrzeuge. Bei dieser Regelung werden Nutzfahrzeuge so dicht aneinander „gekoppelt“, dass sie die Vorteile des Windschattenfahrens nutzen können. Hierbei wird der Abstand 0,5 Sekunden angenommen. Dieser Wert wird ebenso als Extremwert für Pkw getestet.

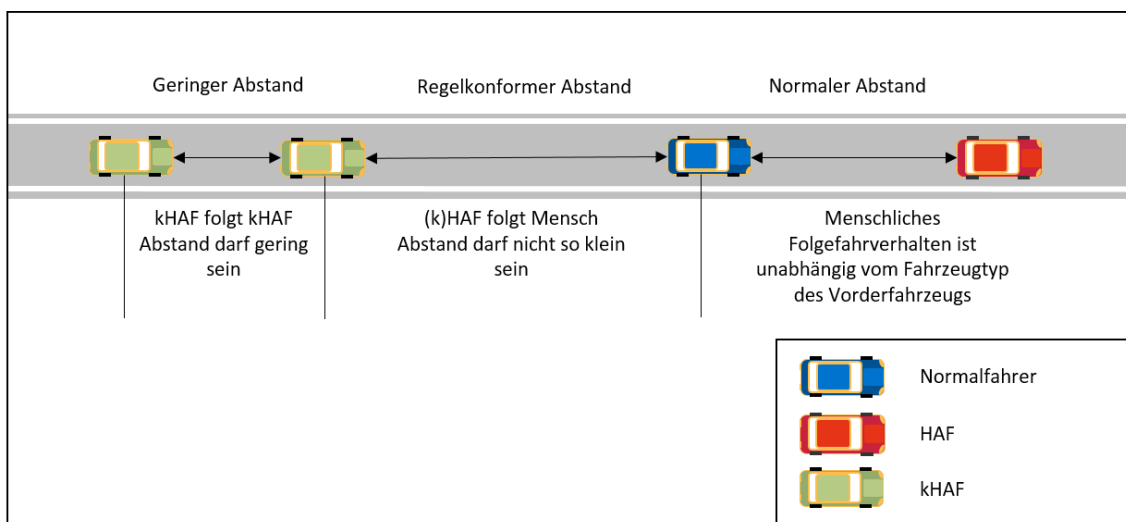
---

<sup>1</sup>In §4 Abs 1 StVO wird für das Abstandhalten geregelt: „Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird.“ [34] Der Bußgeldkatalog präzisiert diese Aussage insofern, als dass sich alle Bußgelder auf ein Unterschreiten des halben Tachowertes (1,8 Sekunden) beziehen. Bußgelder werden beginnend bei einem Abstand von „weniger als 5/10 des halben Tachowertes“ (0,9 Sekunden) fällig, dies gilt bei einer Geschwindigkeit von mehr als 80 km/h. [35]



**Abbildung 6** - Zeitlücken verschiedener Ausprägungen automatisierten Fahrens in der Folgefahrt zu einem Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit

Generell kann davon ausgegangen werden, dass auch automatisierte Fahrzeuge unterschiedliche Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen halten werden, je nach dem, wem sie gerade folgen und wie sie parametrisiert sind. Es wird für die Simulationsstudie angenommen, dass ein automatisiertes Fahrzeug nur dann einem anderen mit sehr geringem Abstand folgen wird, sofern es mit diesem kommunizieren kann. Folgt ein automatisiert fahrendes Fahrzeug einem menschlichen Fahrer, so hat es stets den regelkonformen Abstand (gemäß Bußgeldkatalog) einzuhalten. Das Abstandsverhalten eines Normalfahrers ist hingegen unabhängig vom Typ des vorausfahrenden Fahrzeugs. Die Abbildung 7 illustriert dies.





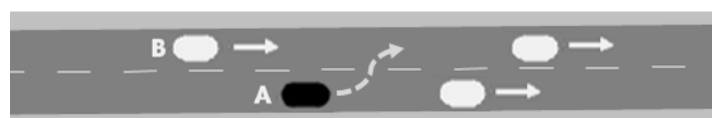
**Abbildung 7** – Darstellung des Abstandsverhaltens des automatisierten Fahrzeugs je nach Ausstattung und Vorderfahrzeug

Die teilautomatisierten Fahrfunktionen, die keine Fahrstreifenwechsel des Fahrzeugs übernehmen, werden so modelliert, dass für alle Aktionen, die die Fahrstreifenwechsel betreffen, das Fahrermodell des Normalfahrers verwendet wird. Für das Fahren innerhalb eines Fahrstreifens wird angenommen, dass das System das Fahrzeug fahrstreifenmittig führt.

Hochautomatisierte Fahrfunktionen und kommunizierende hochautomatisierte Fahrfunktionen übernehmen auch die komplette Querführung des Fahrzeugs. Für das Fahrstreifenwechselverhalten wird von folgenden Hypothesen ausgegangen:

- Hochautomatisierte Fahrzeuge halten auf Autobahnen das Rechtsfahrgebot ein.
- Der Sicherheitsabstand darf beim Fahrstreifenwechsel kurzzeitig verringert werden.
- Ein hochautomatisiertes Fahrzeug führt nur dann Fahrstreifenwechsel durch, wenn die Lücken auf dem Zielfahrstreifen ausreichend groß sind.
- Ist das hochautomatisierte Fahrzeug in der Lage mit den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen zu kommunizieren, können auch kleinere Lücken zum Fahrstreifenwechsel genutzt werden.
- Nach einem Überholvorgang wird sich ein automatisiertes Fahrzeug so schnell wie möglich wieder auf dem rechten Fahrstreifen einordnen, bei diesen Fahrstreifenwechseln gilt das gleiche wie bei den vorgenannten Fahrstreifenwechseln nach links.

Prinzipiell wird das Rechtsfahrgebot eingehalten. Sobald das automatisierte Fahrzeug seine Wunschgeschwindigkeit durch ein langsamerer vorausfahrendes Fahrzeug nicht verwirklichen kann, wird geprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist. Hierbei ist es gestattet, den Sicherheitsabstand kurzzeitig zu verringern, die Lücken auf dem Zielfahrstreifen müssen jedoch ausreichend groß sein. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel eines solchen Fahrstreifenwechsels. Fahrzeug A, das automatisierte Fahrzeug, wird nur solche Lücken auf dem Zielfahrstreifen nutzen, die ausreichend groß sind, sodass B nicht stark verzögern muss und, dass der Sicherheitsabstand auf dem Zielfahrstreifen nicht viel geringer ist als der Wunschabstand in der Folgefahrt. Die sich so ergebende Lücke ist in der Regel größer als die, die der durchschnittliche Normalfahrer nutzen würde. Sollte allerdings Fahrzeug A mit Fahrzeug B kommunizieren können, können auch, nach vorheriger Koordination mit Fahrzeug B, kleinere Lücken genutzt werden.



**Abbildung 8** – Fahrstreifenwechsel eines automatisierten Fahrzeugs nach links

Auch beim Fahrstreifenwechsel nach rechts, illustriert in Abbildung 9, ergeben sich Unterschiede zu den Normalfahrern. Das automatisiert fahrende Fahrzeug wird sich nach einem Fahrstreifenwechsel nach links so bald wie möglich wieder rechts einordnen. Während Normalfahrer häufig sehr lange auf dem linken Fahrstreifen verweilen, werden die automatisierten Fahrzeuge zügig zurück nach rechts wechseln. Im Falle einer vorhandenen Kommunikationsmöglichkeit zum Fahrzeug B noch frühzeitiger.



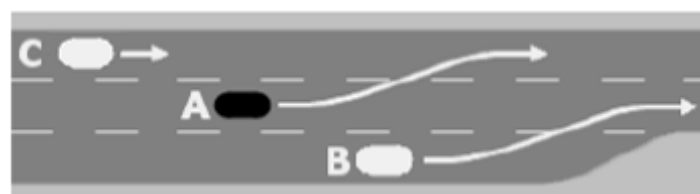
**Abbildung 9** - Fahrstreifenwechsel eines automatisierten Fahrzeugs nach rechts

Eine weitere Art von Fahrverhalten, welches sowohl die Normalfahrer als auch die automatisierten Fahrzeuge beherrschen müssen, stellt das kooperative Fahrverhalten dar. Das bedeutet, dass ein Fahrer oder ein System die Aktionen anderer interpretieren oder präzisieren kann und darauf reagiert. Abbildung 10 stellt ein automatisiertes Fahrzeug (A) dar, welches auf ein Fahrzeug (B) reagieren muss, das den Fahrstreifen wechselt, sodass es sich in den nächsten Sekunden auf demselben Fahrstreifen wie A befinden wird. Das Vorhaben von B kann bereits in der dargestellten Situation von A interpretiert werden, wenn B beispielsweise den Blinker gesetzt hat. Somit kann A verzögern, um B ausreichend Platz zu geben.



**Abbildung 10** – Darstellung der kooperativen Verzögerung, Bild aus [5]

Eine weitere Art der Kooperation stellt der kooperative Fahrstreifenwechsel dar, welcher in Abbildung 11 dargestellt ist. Hierbei erkennt A ebenfalls, dass B einen Fahrstreifenwechsel durchführen wird. A reagiert hierauf mit einem Fahrstreifenwechsel nach links, um B ausreichend Platz auf dem mittleren Fahrstreifen zu gewähren.


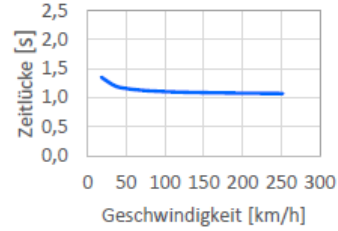
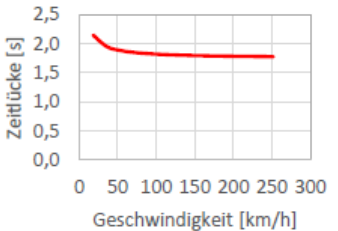
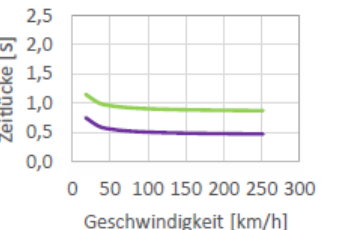
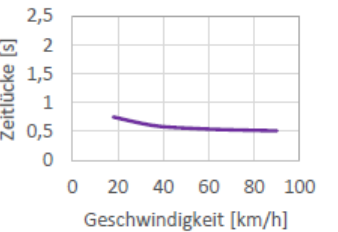





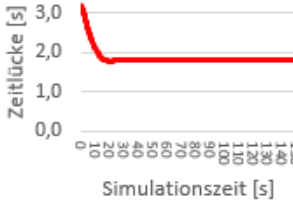
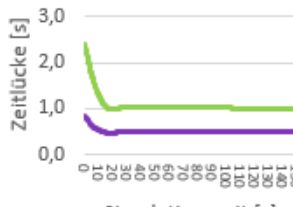
**Abbildung 11** – Darstellung eines kooperativen Fahrstreifenwechsels, Bild aus [5]

In den folgenden Tabellen sind die mit dem Auftraggeber abgestimmten Verhaltensparameter der verschiedenen in der Simulationsstudie betrachteten Fahrzeugtypen wiedergegeben. Die Parameter für das Fahrverhalten des Normalfahrers stammen aus dem Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [4] und werden so wiederverwendet.

### Fahrverhaltensparameter Folgeverhalten

Tabelle 1 – Parametertabelle Fahrzeugfolgeverhalten

Name des Parameters	Erläuterung	Einheit	Normalfahrer	HAF	Kommunizierende HAF
Stillstandsabstand	Abstand zwischen stehenden Fahrzeugen 	m	1.50	2.00	1.50
Zeitlücken	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug PKW	s			
	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug LKW	s			



Name des Parameters	Erläuterung	Einheit	Normalfahrer	HAF	Kommunizierende HAF
Reaktion auf Vorderfahrzeug	Reaktionsbeginn auf langsames Vorderfahrzeug 	s (bis zum Erreichen des Sicherheitsabstands)	-8	-10	-12
Längs-Oszillation in der Fahrfahrt	Kontinuierliche Variation des Abstandsverhaltens 	-	Ja 	Keine 	Keine 
Stillstandsbeschleunigung	Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand	m/s <sup>2</sup>	3.50 (Lkw: 2.50)	3.50 (Lkw: 2.50)	3.50 (Lkw: 2.50)
Wunschbeschleunigung 80 km/h	Wunschbeschleunigung bei 80 km/h	m/s <sup>2</sup>	1.50 (Lkw: 1.00)	1.50 (Lkw: 1.00)	1.50 (Lkw: 1.00)

<b>Name des Parameters</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Normalfahrer</b>	<b>HAF</b>	<b>Kommunizierende HAF</b>
<b>Vorausschauweite</b>	Maximale Vorausschauweite	m	250	250	500
<b>Anzahl betrachteter Vorderfahrzeuge</b>	Anzahl der Vorderfahrzeuge, die ein Fahrzeug nach vorn schauen kann	-	2	1	4

### Fahrverhaltensparameter Fahrstreifenwechsel

Tabelle 2 – Parametertabelle Fahrstreifenwechselverhalten

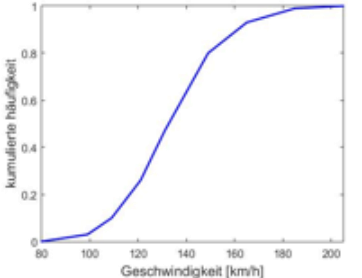
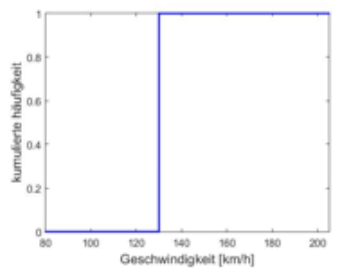
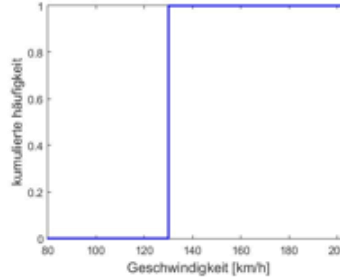
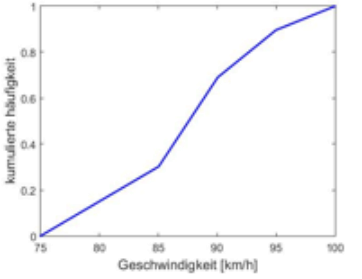
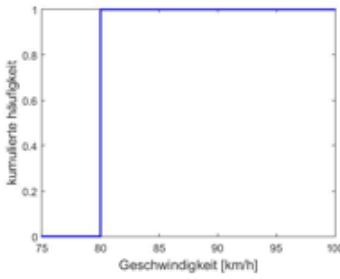
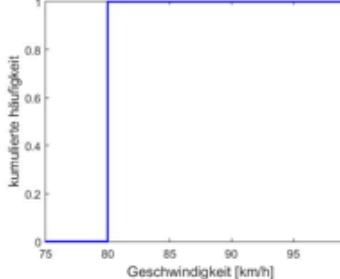
Name des Parameters		Erläuterung	Einheit	Normalfahrer	HAF	Kommunizierende HAF
<b>Grundverhalten</b>			-	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot	Rechtsfahrgebot
<b>Notwendiger Fahrstreifenwechsel</b>	<b>Maximale Verzögerung (Eigene)</b>	Maximale Verzögerung für Fahrstreifenwechsel aufgrund der vorgegebenen Routen für das eigene überholende Fahrzeug	m/s <sup>2</sup>	-4.00	-4.00	-4.00
	<b>Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)</b>	Obergrenzen der Verzögerung für das Folgefahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel	m/s <sup>2</sup>	-3.00	-2.50	-3.00
	<b>Akzeptierte Verzögerung (Eigene)</b>	Untergrenzen der Verzögerung für das eigene Fahrzeug für einen Fahrstreifenwechsel	m/s <sup>2</sup>	-1.00	-1.00	-1.00
	<b>Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)</b>	Untergrenzen der Verzögerung für das Folgefahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel	m/s <sup>2</sup>	-0.75 (Lkw: -0.50)	-0.75 (Lkw: -0.50)	-0.75 (Lkw: -0.50)
<b>Minimum Nettoweglücke (vorne/hinten)</b>		Mindestabstand, der nach einem Fahrstreifenwechsel zwischen zwei Fahrzeugen mindestens vorhanden sein muss	m	0.50	1.00	0.50
<b>Auf langsameren Fahrstreifen wenn Kollisionszeit mind. s</b>		Mindestabstand in Sekunden, der zu einem Vordermann auf dem langsameren Fahrstreifen vorhanden sein muss, damit ein überholendes Fahrzeug auf den langsameren Fahrstreifen wechselt.	s	11 (Lkw: 1)	8 (Lkw: 1)	8 (Lkw: 1)

Name des Parameters		Erläuterung	Einheit	Normalfahrer	HAF	Kommunizierende HAF
<b>Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand</b>		Ursprünglicher Sicherheitsabstand • Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand = Abstand der beim Fahrstreifenwechsel ausreichend ist	-	0.6	0.6	0.6
<b>Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen</b>		maximale Verzögerung die Fahrer wählen würde um anderen Fahrer einsichern zu lassen 	m/s <sup>2</sup>	-3	-3	-3
<b>Kooperative Fahrstreifenwechsel</b>		Fahrer wechselt Fahrstreifen, um anderen Fahrer einsichern zu lassen 		✓ (Lkw: nein)	✓ (Lkw: nein)	✓ (Lkw: nein)
<b>Kooperativer Fahrstreifenwechsel</b>	<b>Maximum Geschwindigkeitsdifferenz</b>	maximale Geschwindigkeitsdifferenz bei der ein kooperativer Fahrstreifenwechsel noch durchgeführt wird	km/h	10.80	10.80	wird über die Kommunikation geregelt, Schwellwert für Geschwindigkeitsdifferenz daher nicht mehr notwendig



Verteilungen

Tabelle 3 – Verteilungen für die Fahrzeuge innerhalb der Simulation

Name der Verteilung	Erläuterung	Normalfahrer	HAF	Kommunizierende HAF
Wunschgeschwindigkeitsverteilung	Geschwindigkeit, mit der ein Fahrer fahren würde, wenn er nicht durch andere Fahrzeuge daran gehindert würde			
		Normalfahrer Lkw	HAF - Lkw	Kommunizierende HAF - Lkw
				

## 2.2 Straßennetz und Netzelemente

Die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das ganze deutsche Autobahnnetz werden bestimmt, indem der Verkehr auf kleinen Ausschnitten des Autobahnnetzes simuliert wird und die Wirkungen dort kleinräumig ermittelt werden. Anschließend werden die Erkenntnisse aus diesen lokalen Simulationen auf das Gesamtnetz hochgerechnet. Dazu müssen Netzelemente (z. B. freie Strecke, Einfahrt, Ausfahrt und Verflechtung in verschiedenen Ausprägungen) definiert werden, auf denen simuliert wird, und aus denen sich dann das Gesamtnetz zusammensetzen lässt. Eine solche Definition von Netzelementen kann dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) entnommen werden. Im HBS werden auch die Kapazitäten dieser Netzelemente bei heutigem Verkehr angegeben. Es liegt also nahe, auf diese in der Verkehrstechnik etablierte Strukturierung des Straßennetzes aufzusetzen.

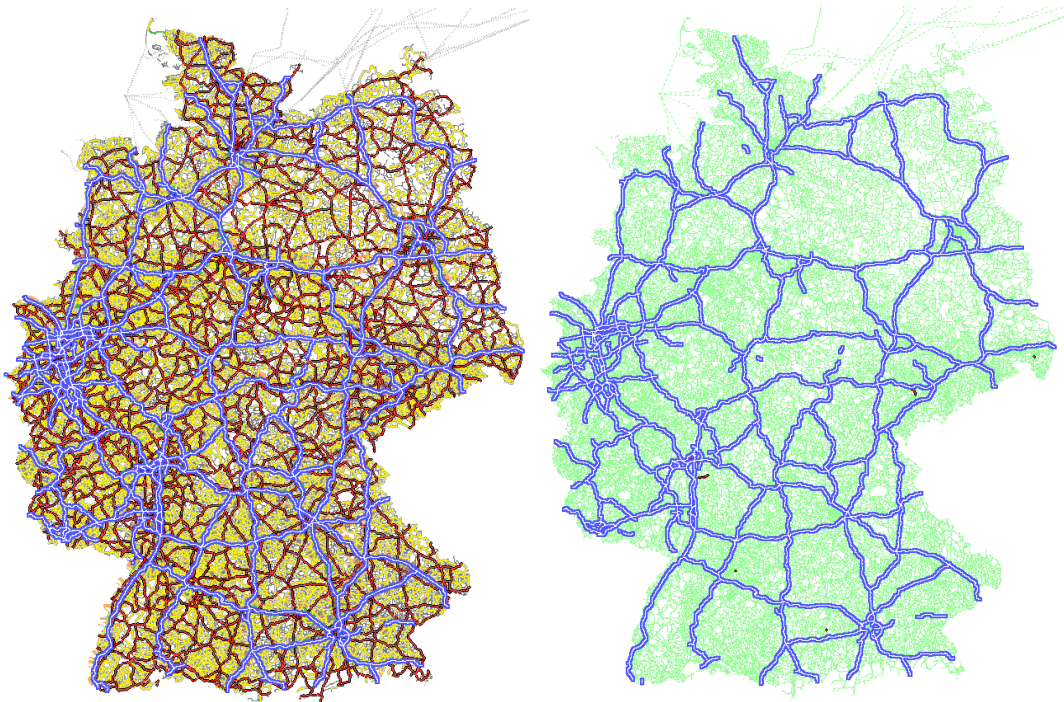
Ein weiterer Vorteil der Verwendung der im HBS definierten Netzelemente ist, dass in einem Projekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Straßennetzes“ [4]) eine Methodik zur Bestimmung der Kapazität aus Verkehrsfluss-Simulationen erarbeitet wurde und für den heutigen Verkehr bereits kalibrierte Modelle dieser Netzelemente vorliegen.

Für die Hochrechnung wird ein Modell des gesamten Autobahnnetzes benötigt. Dieses Modell muss auch mindestens die Verkehrsbelastungen der Netzelemente beinhalten, um Aussagen machen zu können, wie sich die veränderten Kapazitäten auf die Reisezeiten auswirken. Wenn auch die Verkehrsnachfrage enthalten ist, also die Information, von wo nach wo die Fahrzeuge fahren wollen, können zusätzlich Verlagerungseffekte im Straßennetz abgebildet werden.

Zur Auswahl stehen in Deutschland eigentlich nur zwei Netzmodelle: Das bundeseigene, für die Bundesverkehrswegeplanung eingesetzte NEMOBFSr und das kommerziell vertrieben VALIDATE der PTV Group. Aufgrund von Zugangsbeschränkungen beim bundeseigenen Modell sowie der unklaren Situation, was die Verfügbarkeit der Verkehrsnachfrage betrifft, wurde im vorliegenden Projekt das Modell VALIDATE verwendet, das im Folgenden vorgestellt wird.

### 2.2.1 Eigenschaften des Straßennetzmodells VALIDATE

Das Modell VALIDATE ist ein Modell des gesamten Hauptstraßennetzes in Deutschland. Es ermöglicht vor allem eine großräumige Analyse von Verkehrsmaßnahmen und deren Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur. Das Modell beinhaltet verkehrsplanerische Kapazitäten für alle Netzelemente sowie den Tagesverlauf der Verkehrsnachfrage (ca. 120 Millionen Fahrten) in Stundenschritten für einen durchschnittlichen Tag (Di – Do Werte). Mit über 8 Millionen Kanten und 1 Million Knoten handelt es sich um eines der größten Verkehrsmodelle der Welt.



**Abbildung 12** – Straßennetzmodell VALIDATE (links), betrachtetes Straßennetz (rechts)

Die im Modell umgelegte Verkehrsnachfrage liefert die Verkehrsbelastungen auf allen Strecken in Stundenschritten. Um die Tauglichkeit des Modells für die beabsichtigte Hochrechnung zu beurteilen, wurde die im Modell errechnete Fahrleistung auf dem BAB-Netz mit den Ergebnissen der offiziell für Deutschland erhobenen Inlandsfahrleistung [6] abgeglichen: Die Inlandsfahrleistung auf dem BAB-Netz beträgt 228.279,2 Mio. Fz-km, aus dem VALIDATE-Modell ergeben sich 228.097,437 Mio. Fz-km. Das ist eine sehr gute Übereinstimmung (Abweichung -0,08 %).

Um die Auslastung der Straßen zu bestimmen, wurde eine Umlegung der von der PTV Group modellierten Verkehrsnachfrage durchgeführt. In dem ersten Auswertungsschritt wurden aus dem Auslastungsgrad auf den Kanten die entsprechenden Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) A bis F berechnet. In Abbildung 13 ist die Auslastung des Netzes innerhalb der Spitzenstunde für die Tagesgruppe Dienstag bis Donnerstag visualisiert.

Tabelle 4 stellt die aggregierten Ergebnisse für das gesamte Bundesautobahnnetz dar. Kapazitätsänderungen durch automatisierte Fahrzeuge werden sich besonders an Stellen hoher Auslastung, also an Engpässen, auswirken. Solche Engpässe (Strecken, die mit QSV F bewertet wurden) repräsentieren ca. 6% des gesamten Streckennetzes und sind vor allem in den Ballungsräumen zu finden. Bei den im Straßennetzmodell VALIDATE enthaltenen Kapazitäten handelt es sich um planerische Kapazitäten, also um dauerhafte (bauliche) und nicht um temporäre Engpässe, die etwa durch Baustellen oder Unfälle entstehen.

Tabelle 4 – Verteilung der QSV im BAB-Netz in VALIDATE

	QSV A	QSV B	QSV C	QSV D	QSV E	QSV F
<b>Auslastungsgrad</b>	$\leq 0,3$	$\leq 0,55$	$\leq 0,75$	$\leq 0,9$	$\leq 1,0$	$\geq 1,0$
<b>Anzahl Strecken</b>	19 081	35 639	12 589	5 528	2 150	5 136
<b>Anteil</b>	24%	44%	16%	7%	3%	6%

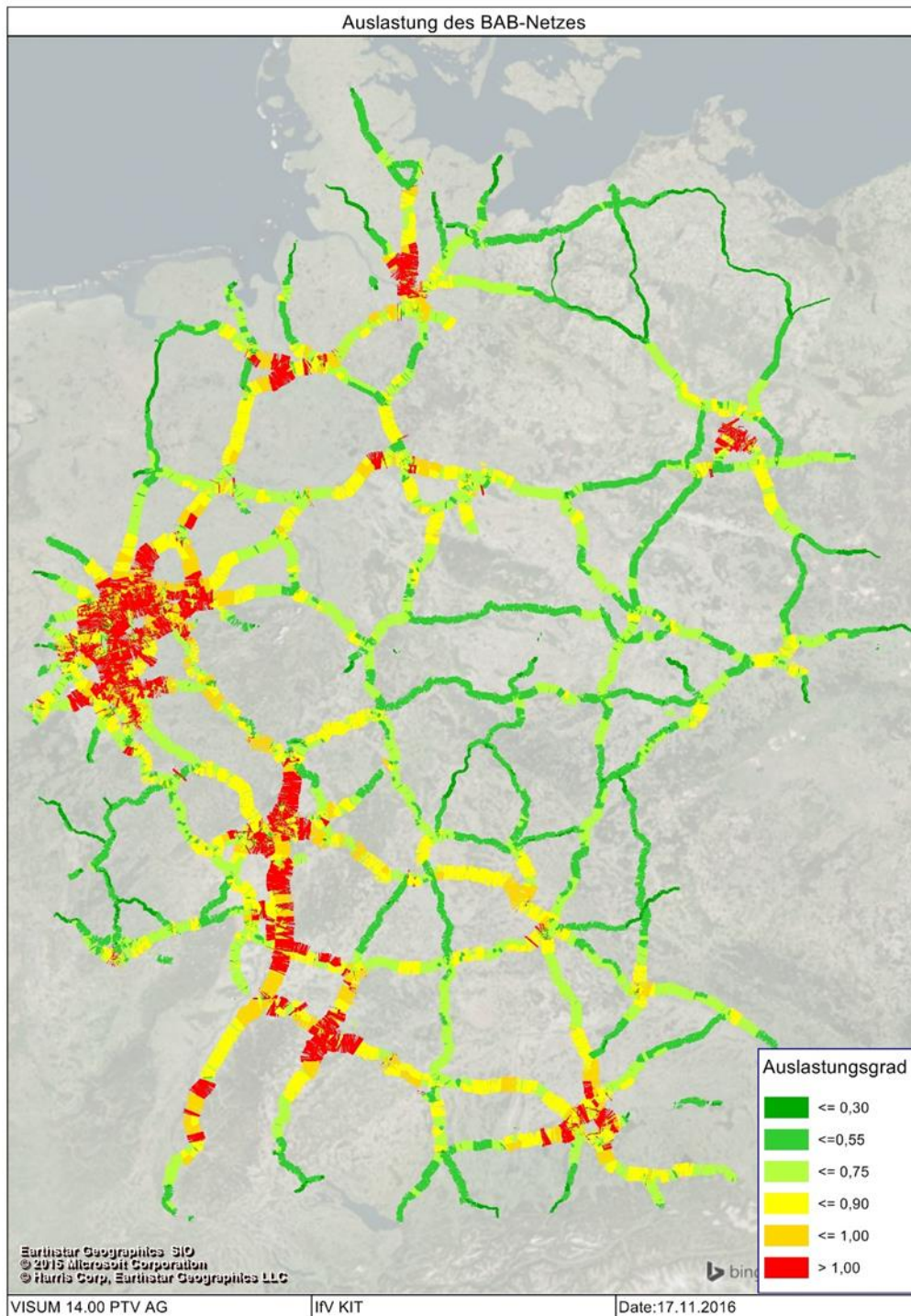
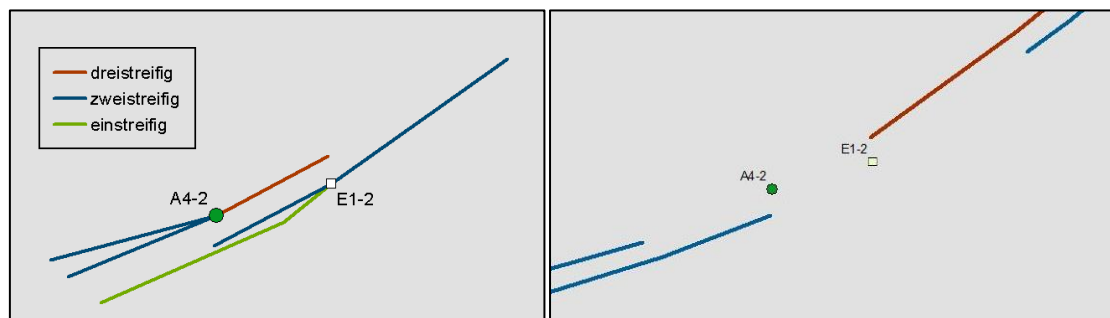


Abbildung 13 – Auslastung des BAB-Netzes

## 2.2.2 Zuordnung der HBS-Netzelemente

Das HBS 2015 [1] listet einen Katalog von Netzelementen (freie Strecken, Knotenpunkte) auf, die auf den Bundesautobahnen (BAB) abhängig von der Kategorisierung der Autobahn nach RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen) [7] zulässig sind. Ziel der Untersuchung in diesem Kapitel ist es, die im realen BAB-Netz in Deutschland gegebenen Netzelemente den HBS-Typen zuzuordnen.

Da die im HBS definierten Teilknotenpunkttypen nach der Anzahl der Fahrstreifen stromauf- und abwärts sowie nach der Anzahl der Fahrstreifen in der Rampe differenziert sind, ist die Zuordnung anhand der Attributierung im Straßennetzmodell möglich. In einer räumlichen Analyse wurde das Straßennetz in mehreren Schritten zerlegt, bis einzelne Einflussbereiche der Knotenpunkte zu erkennen sind. Der Einflussbereich eines Knotenpunktes wird im Straßennetzmodell durch drei Kanten modelliert (Hauptfahrbahn stromaufwärts und stromabwärts von dem Knotenpunkt, Rampe), die jeweils eine bestimmte Anzahl von Fahrstreifen aufweisen (Abbildung 14 links). Die an den Knotenpunkt angrenzenden Kanten sind im Straßennetzmodell im Durchschnitt ca. 200 m lang, was der Länge der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungstreifen auf der BAB ungefähr entspricht. Die restlichen Kanten zwischen angrenzenden Knotenpunkten sind den freien Strecken zugeordnet. Abbildung 14 zeigt beispielsweise die Zuordnung einer Einfahrt vom Typ E1-2 und einer Ausfahrt vom Typ A4-2, wobei die Farbkodierung auf eine unterschiedliche Anzahl von Fahrstreifen hinweist.



**Abbildung 14** – Zuordnung der HBS-Elemente - Knotenpunkt (links), freie Strecke (rechts)

Abbildung 15 stellt als Beispiel die Sammlung von HBS-konformen Einfahrten dar. Da sich mit Hilfe der im Straßennetzmodell enthaltenen Information nicht zwischen Einfahrten vom Typ E1-2 und E2-2 bzw. E1-3 und E2-3 unterscheiden lässt und da diese auch nach der HBS-Definition die gleiche Kapazität ausweisen, werden sie in der Zuordnung zu einem Einfahrtstyp E1-2/E2-2 bzw. E1-3/E2-3 zusammengefasst.

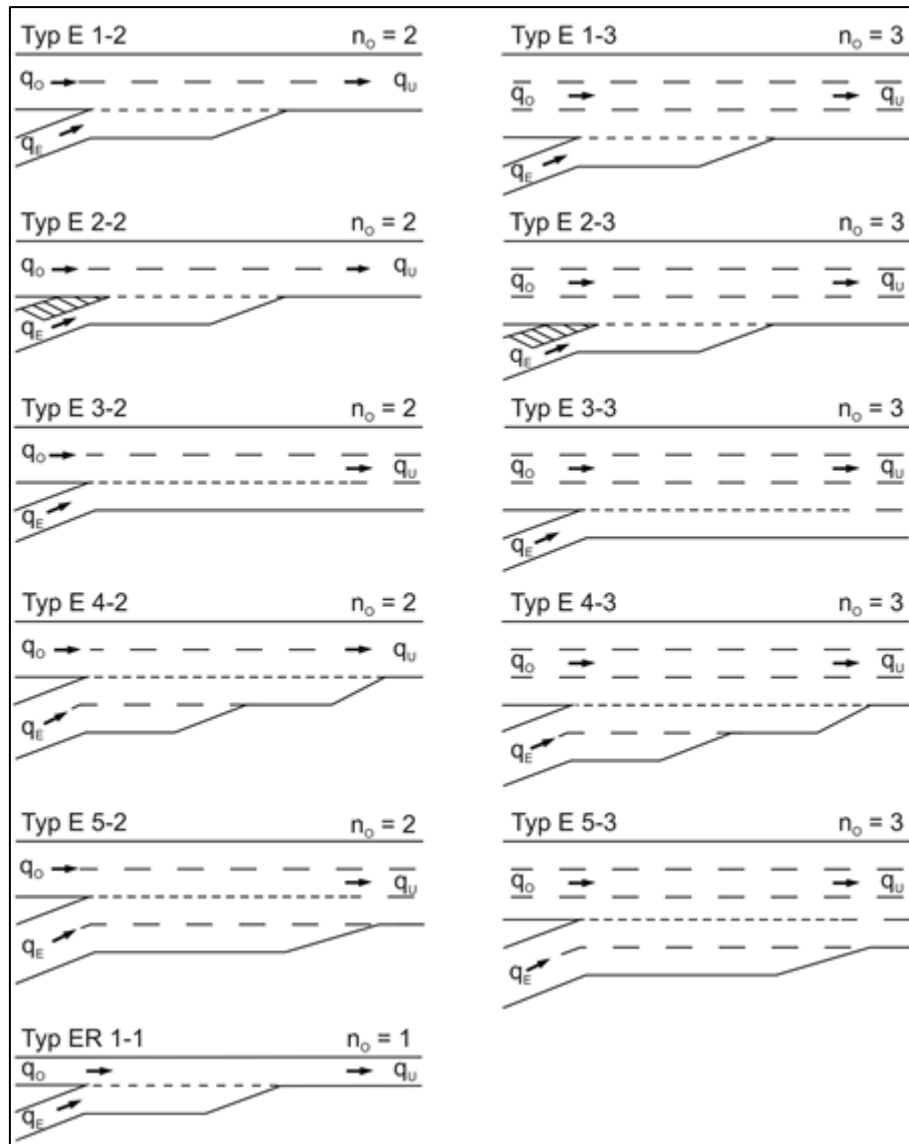
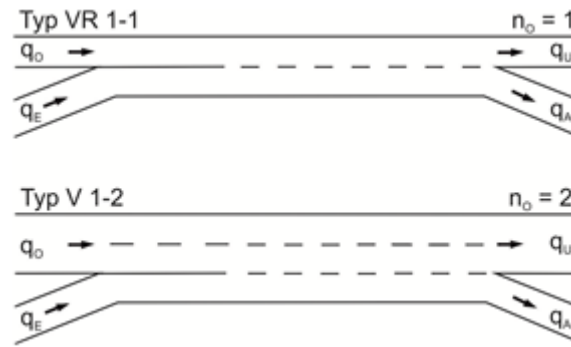


Abbildung 15 – Typen von Einfahrten nach HBS 2015 [1]

Weil diese Herangehensweise für die Zuordnung von Verflechtungen anhand der Attribuierung von Kanten im Modell nicht direkt anwendbar ist, wurden Verflechtungen teilweise manuell nachbearbeitet. Es wurde zwischen Verflechtungen auf der Hauptfahrbahn (HBS-Typ V 1-2) und in der Verteilerfahrbahn (HBS-Typ VR 1-1) unterschieden.



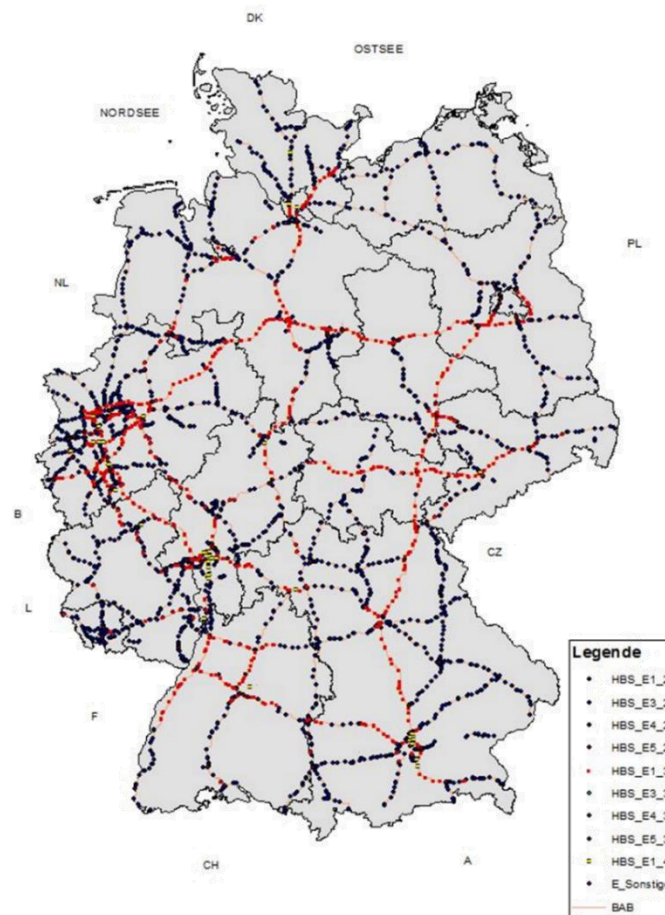
**Abbildung 16** – Typen von Verflechtungsstrecken nach HBS 2015 [1]

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Charakteristik der zugeordneten freien Strecken in VALIDATE. Im HBS ist die Kapazität einer Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der Fahrstreifenanzahl, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der Längsneigung, dem Schwerverkehrsanteil und der Lage der Bundesautobahn differenziert (und ist somit in Tabelle 5 durch ein Intervall repräsentiert). In VALIDATE ist die Kapazität nur in Abhängigkeit von der Fahrstreifenanzahl differenziert und liegt im unteren Bereich des vom HBS definierten Kapazitätsbereiches.

**Tabelle 5** – Statistik der freien Strecken im Straßennetzmodell VALIDATE

BAB freie Strecken	Anzahl	Länge [km]	Kapazität VALIDATE [Kfz/h]				HBS-Kapazität [Kfz/h]			
			zulässige Höchstgeschwindigkeit [km/h]							
			80	100	120	-	80	100	120	-
<i>zweistreifig</i>	42 530	13 441	3300	3300	3500	3500	3400 - 3900			
<i>dreistreifig</i>	18 355	5 207	4950	4950	5250	5250	4900 - 5700			
<i>vierstreifig</i>	960	150	6600	6600	7000	7000	6700 - 7800			
<b>Summe</b>	<b>61 845</b>	<b>18 798</b>								

Abbildung 17 zeigt als Beispiel für die Zuordnungsergebnisse die Klassifikation der Einfahrten nach HBS-Typen im BAB-Netz. Aus der Abbildung ist der Ausbau der Autobahn in Form der Fahrstreifenanzahl (zweistreifig: blau, dreistreifig: rot, vierstreifig: gelb) erkennbar.



**Abbildung 17** – Zuordnung der Einfahrten nach HBS-Typ zum Bundesautobahnnetz

Tabelle 6 fasst die HBS-Netzelemente, deren Häufigkeit und Auslastung im Straßennetzmodell und die planerische Kapazität anhand des HBS-Regelwerks zusammen. Die Häufigkeitsanalyse zeigt, dass der Typ E1-2 bzw. A1-2 ca. 70% aller Ein- und Ausfahrten ausmacht. Am zweithäufigsten kommt der Typ E1-3 bzw. A1-3 vor. Alle anderen Knotenpunkttypen sind im BAB-Netz mit einem Anteil von unter 3%, die meisten sogar unter 1%, repräsentiert. Die Auslastungsstatistik zeigt, dass die im Mittel am stärksten ausgelasteten Elemente nicht den häufigsten Netzelementen entsprechen, sondern durch den Typ E3-3 bzw. A7-2 vertreten sind.

**Tabelle 6** – Statistik der HBS-Elemente in 97%-Perzentil des deutschen BAB-Netz

HBS-Element Einfahrten	Anzahl	Häufigkeit	Auslastung		HBS-Kapazität [Pkw-E/h]	
			Mittelwert	STD	Rampe	Hauptfahrbahn*
<b>E1-2/E2-2</b>	3.267	69,1%	0,62	0,28	1.800	4.000
<b>E3-2</b>	117	2,5%	0,70	0,18	2.000	4.000
<b>E4-2</b>	61	1,3%	0,69	0,34	1.800	5.800
<b>E5-2</b>	43	0,9%	0,78	0,22	3.800	4.000
<b>E1-3/E2-3</b>	1.106	23,4%	0,72	0,23	1.800	5.800
<b>E3-3</b>	12	0,3%	0,91	0,29	2.000	5.800
<b>E4-3</b>	58	1,2%	0,83	0,26	3.600	5.800
<b>E5-3</b>	22	0,5%	0,84	0,24	3.800	5.800



<b>E1-4</b>	41	0,9%	0,84	0,17	1.800	-
<b>Summe</b>	<b>4.727</b>	<b>100%</b>				
<b>Ausfahrten</b>					Rampe	Hauptfahrbahn**
<b>A1-2</b>	3.294	69,5%	0,6	0,28	1.800	4.000
<b>A2-2</b>	109	2,3%	0,61	0,35	3.060	4.000
<b>A3-2</b>	65	1,4%	0,69	0,36	3.600	4.000
<b>A4-2</b>	4	0,1%	0,84	0,18	3.600	4.000
<b>A5-2</b>	12	0,3%	0,83	0,42	3.600	4.000
<b>A6-2</b>	30	0,6%	0,71	0,16	2.000	4.000
<b>A7-2</b>	2	0,0%	0,93	0,21	3.060	4.000
<b>A8-2</b>	9	0,2%	0,68	0,17	3.600	4.000
<b>A1-3</b>	1.035	21,8%	0,71	0,22	1.800	5.800
<b>A2-3</b>	44	0,9%	0,68	0,24	3.060	5.800
<b>A3-3</b>	51	1,1%	0,78	0,27	3.600	5.800
<b>A4-3</b>	17	0,4%	0,83	0,28	3.600	5.800
<b>A5-3</b>	7	0,1%	0,81	0,28	3.600	5.800
<b>A6-3</b>	10	0,2%	0,96	0,29	2.000	5.800
<b>A7-3</b>	1	0,0%	0,95	-	3.060	5.800
<b>A1-4</b>	34	0,7%	0,72	0,23	1.800	-
<b>Sonstiges</b>	16	0,3%	-	-	-	-
<b>Summe</b>	<b>4.740</b>	<b>100%</b>				
<b>Verflechtungen</b>						
<b>VR1-1</b>	554	89,1%	-	-	1.800	2.000
<b>V1-2</b>	59	9,5%	-	-	1.800	4.000
<b>Sonstiges</b>	9	1,4%	-	-	-	-
<b>Summe</b>	<b>622</b>	<b>100%</b>				
<b>Σ aller Knoten</b>	<b>10.089</b>					
<b>Freie Strecke†</b>					Kapazität abhängig von zulässigen Höchstgeschwindigkeit, Längsneigung, SV-Anteil, FS-Anzahl & Lage [1]	
<b>2FS</b>	42.530	68,8%	0,66	0,29		
<b>3FS</b>	18.355	29,7%	0,75	0,24		
<b>4FS</b>	960	1,6%	0,82	0,22		
<b>Summe</b>	<b>61.845</b>	<b>100%</b>				

\*maximale Kapazität der durchgehenden Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt

\*\* maximale Kapazität der durchgehenden Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt

† entspricht der Anzahl der Kanten auf BAB im Straßennetzmodell

Da aus Aufwandsgründen nicht alle Netzelemente in der Simulation untersucht werden konnten, wurde anhand der obigen Statistik eine Auswahl getroffen. Tabelle 7 zeigt die Netzelemente, die für die Simulation ausgewählt wurden. Die Auswahl schließt die Netzelemente aus, die entweder im Straßennetz selten vorkommen oder deren Kapazität aufgrund ähnlicher Charakteristik aus einem anderen Netzelementen auch ohne Simulation abgeleitet werden kann.

**Tabelle 7 – Betrachtete HBS Netzelemente**

<b>Netzelement</b>	<b>Auswahl</b>
Einfahrt	E1-2/E2-2, E1-3/E2-3, E1-4
Ausfahrt	A1-2, A2-3, A4-2
Verflechtung	VR1-1
Freie Strecke	2FS, 3FS

## 3 Flotten-Modell

### 3.1 Methodik

Der Anteil an automatisierten Fahrzeugen innerhalb der Fahrzeugflotte in Deutschland hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität des Netzes und damit auf die Indikatoren der Verkehrsqualität wie Auslastungsgrad, Fahrzeit oder mittlere Geschwindigkeit. Deshalb ist eine Prognose über die Entwicklung der Fahrzeugflotte in den kommenden Jahren eine wichtige Komponente des Projekts. Dieses Kapitel stellt ein Diffusionsmodell vor, das eine vereinfachte Prognose der Pkw- und Lkw-Fahrzeugflotte in Deutschland ermöglicht. Dabei wird auch die Einführung von Assistenzsystemen und deren Marktdurchdringung in die Fahrzeugflotte abgebildet. Da es sich um ein komplexes Problem handelt, sind mehrere Annahmen notwendig, um zu einer vereinfachten Prognose zu gelangen.

Der Modellansatz basiert auf historischen Daten des Fahrzeugbestands und auf Erfahrungswerten zur Einführung von Automatisierungs-Technologien. Es wird angenommen, dass die Einführung der Automatisierung in Fahrzeugen in Deutschland überwiegend in den oberen Fahrzeugklassen beginnt (Top-down Ansatz). Weiterhin geht das Verfahren davon aus, dass es in der nahen Zukunft keine Änderung der Rechtslage gibt, die die Einführung der Automatisierung vor-schreibt und damit die Marktdurchdringung stark beschleunigt.

Abbildung 18 stellt die Modellierung der Fahrzeugflotte in drei Teilmodellen dar. Im ersten Schritt wird die Altersverteilung der Fahrzeugflotte in Deutschland bis 2050 prognostiziert. Das Jahr 2050 wurde als Zeithorizont bestimmt, um Szenarien mit einem signifikanten Anteil an voll-automatisierten Fahrzeugen abbilden zu können. In zweitem Modellierungsschritt wird anhand der vorhandenen Daten zur Verfügbarkeit der teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge im Markt die Technologie in die Fahrzeugflotte eingeführt. Mittels modellierter Faktoren zum jährlichen Anteil von neuzugelassenen Fahrzeugen mit bestimmten Assistenzsystemen ergibt sich die Durchdringung der Systeme in der Fahrzeugflotte. Diese Faktoren werden anhand von historischen Daten von vergleichbaren Assistenzsystemen (ABS, ESP, ACC etc.) bestimmt. Als Ergebnis entsteht eine Statistik des Fahrzeugbestands mit einem bestimmten Anteil an konventionellen (KF) und automatisierten Fahrzeugen (AF). Um den Anteil an automatisierten Fahrzeugen auf den Fernstraßen zu bestimmen, werden Nutzungsprofile analysiert, die aus einer repräsentativen deutschen Pkw-Flotte abgeleitet werden. Es wird angenommen, dass die Nutzungsprofile der Zielpersonengruppen, die die konventionellen Fahrzeuge durch automatisierte Fahrzeuge ersetzen könnten, vor allem Vielfahrer repräsentieren. Schließlich wird die Fahrzeugflotte mit einem bestimmten Anteil an automatisierten Fahrzeugen weiter nach ihrer Fahrleistung differenziert, um Zuschläge für die erhöhte Nutzung des Fernstraßennetzes abzubilden. Weil die Bestimmung der Nutzungsgraden anhand von vielen Annahmen bestimmt ist und somit mit einer erhöhten Unsicherheit verbunden ist, wird in der Simulation der Nutzungsgrad zunächst

gleich dem Ausstattungsgrad gesetzt. Die Verwendung der Ausstattungsraten bedeutet faktisch eine Verschiebung der Auswirkungen in der Zeit und beeinflusst ausschließlich die Mischszenarien während der Übergangsphase. Die modellierten Anteile der Ausstattung werden als Eingabe für die Fahrzeugzusammensetzung in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM verwendet. Die Ergebnisse der Simulation bestimmen die Auswirkungen der Fahrzeugflotte auf den Verkehrsfluss unter Berücksichtigung eines gegebenen Anteils an automatisierten Fahrzeugen und werden für AP3 (Hochrechnung) weitergegeben.

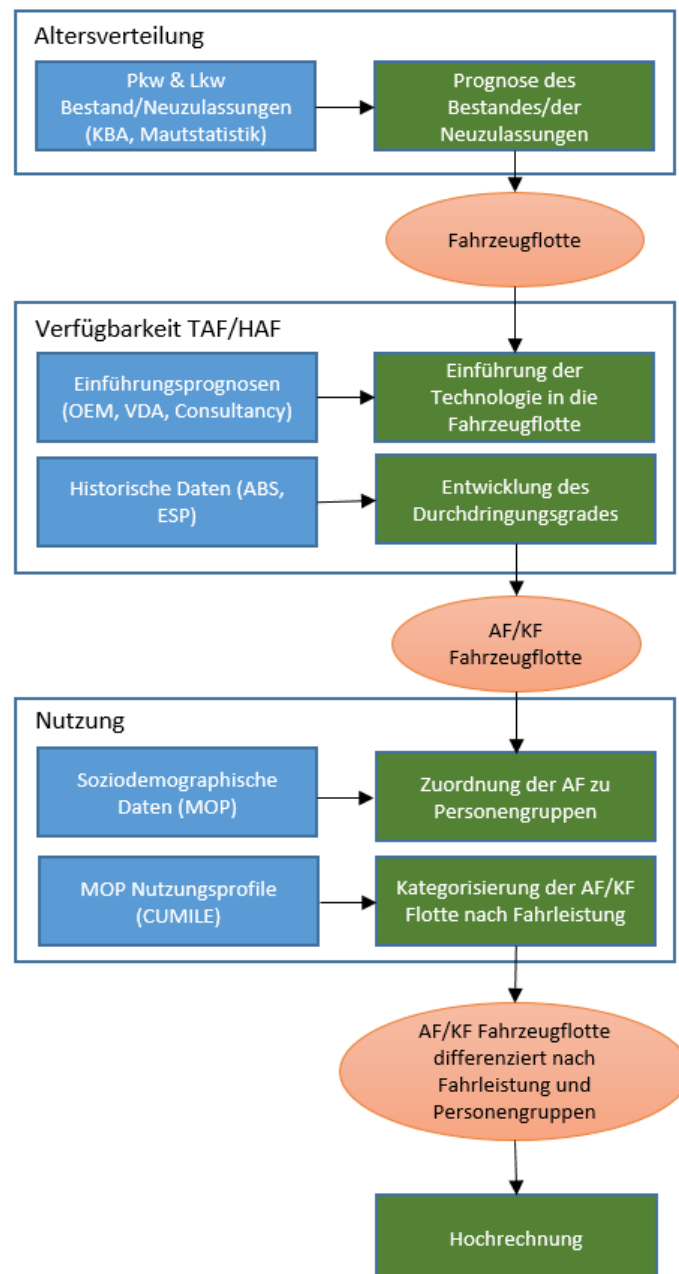


Abbildung 18 – Workflow des Fahrzeugflottenmodells

## 3.2 Altersverteilung der Fahrzeugflotte

Für die Modellierung der Marktdurchdringung der Automatisierung in der deutschen Fahrzeugflotte wird ein Teilmodell für die Altersverteilung von Fahrzeugen in Deutschland entwickelt. Das Teilmodell bildet die Pkw- und Lkw-Flotten auf dem deutschen Fernstraßennetz ab. Weil sich die Anteile an ausländischen Pkw bzw. Lkw in deutschen Fernstraßen stark unterscheiden, ist eine getrennte Modellierung der beiden Flotten notwendig. Im Pkw-Segment beträgt der ausländische Teil der Flotte nur ca. 6% (abgeleitet aus [8]) was die Nutzung der Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA) [9] als Datengrundlage zulässt. Die ausländische Lkw-Flotte hingegen repräsentiert ca. einen 40% Anteil der Lkw-Gesamtflotte auf den Fernstraßen in Deutschland [10]. Aus diesem Grund wird die Mautstatistik des Bundesamts für Güterverkehr (BAG), die ein genaues Bild der Fahrzeugzusammensetzung auf den bemauteten Straßen (in anderen Worten Fernstraßen) gibt, als Ergänzung zur KBA-Statistik verwendet.

### 3.2.1 Pkw-Flotte

Die KBA-Statistik über den Fahrzeugbestand und das Jahr der ersten Zulassung wurde zwischen 1976 und 2015 erhoben. Der aktuelle Pkw-Bestand in Deutschland beträgt laut KBA-Statistik ca. 44,3 Millionen Pkw (Abbildung 19), die Anzahl der Neuzulassungen geht seit 2011 leicht zurück (Abbildung 20). In Rahmen der Entwicklung des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2015 wurde eine Zunahme des Verkehrsaufkommens (+1,2%) sowie der Verkehrsleistung (+12,2%) im gesamten Personenverkehr zwischen den Jahren 2010 und 2030 prognostiziert [11]. Der BVWP zeigt außerdem, dass der Zuwachs des motorisierten Verkehrs in dieser Zeitspanne bei 12,9% liegt, was einem jährlichen Wachstum von 0,6% entspricht. Dagegen prognostiziert die Shell Studie [12] eine Sättigung des Pkw-Marktes (s.g. Peak Car) für das Jahr 2022 (PKW-Bestand) bzw. 2028 (Pkw-Motorisierung). Abbildung 19 stellt die verschiedenen Pkw-Bestandsprognosen in einem Diagramm dar. Aufgrund einer Methodikänderung der Fahrzeugbestandsberechnung zum 1.1.2008 (die vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge wurden nicht mehr in den Fahrzeugbestand eingerechnet, sondern als „Außerbetriebsetzung“ verzeichnet), wurde die KBA Zeitlinie pauschal um 10% bereinigt, um einen aussagekräftigeren Trend des Zuwachses des Pkw-Bestands zu erhalten.

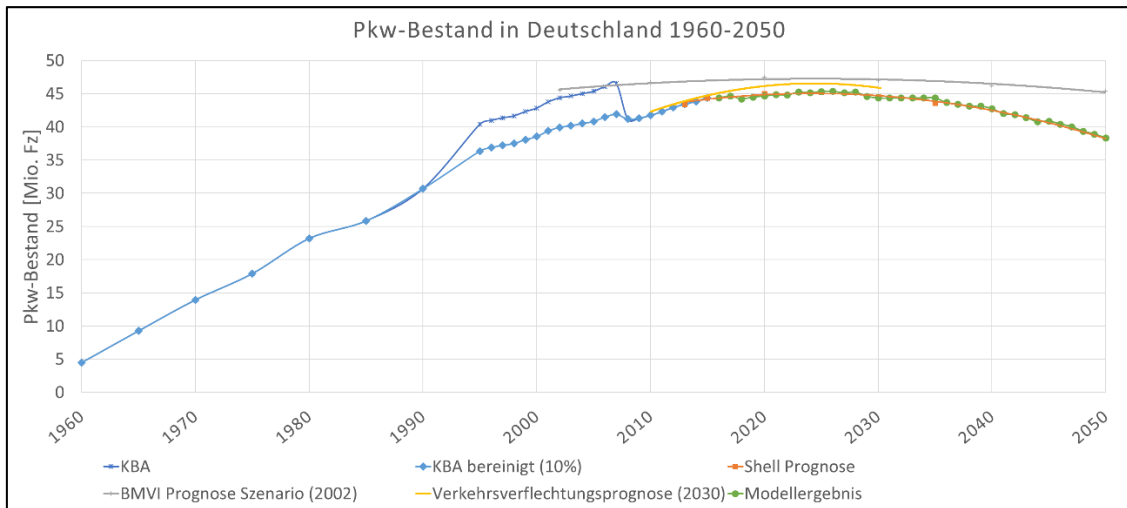


Abbildung 19 – Pkw-Bestand in Deutschland (1960-2050) [9]

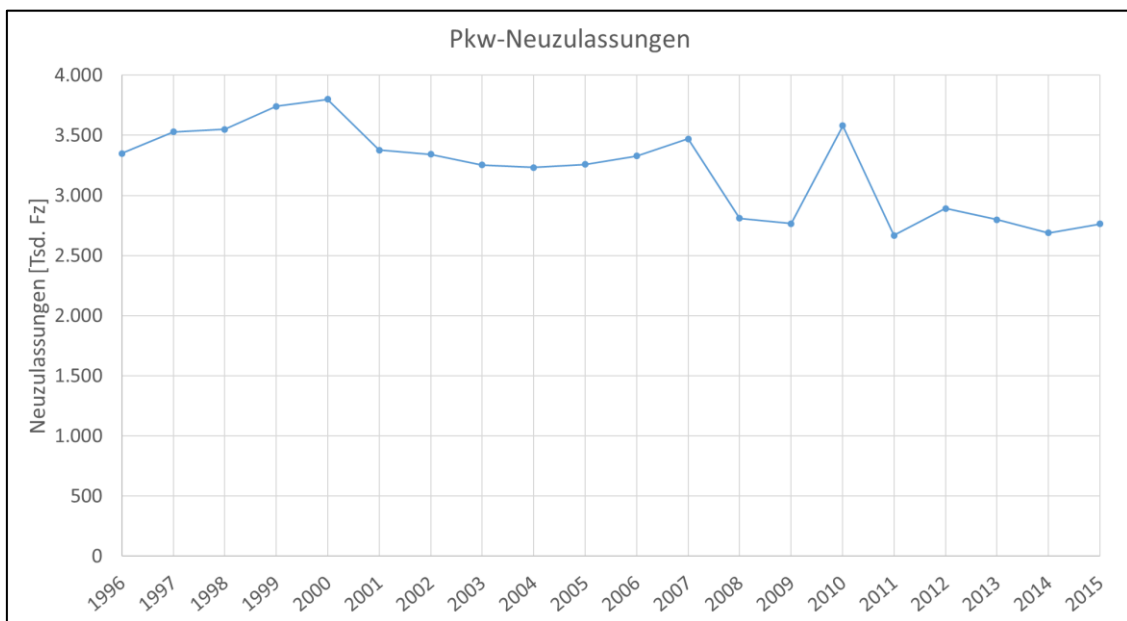


Abbildung 20 – Pkw-Neuzulassungen in Deutschland (1996-2015) [9]

Anhand der KBA-Statistik über den Pkw-Bestand können Trends ermittelt werden, die eine Prognose des Pkw-Flottenalters bis 2050 ermöglichen. Bei dem Blick auf die KBA-Statistik ist festzustellen, dass die Pkw-Flotte in Deutschland älter wird: Das Durchschnittsalter des Pkw ist zwischen 2002 und 2015 von 7,2 auf 9,0 Jahre gestiegen. Dies bedeutet eine durchschnittliche Alterung der Pkw-Flotte von 0,1 Jahren p.a. Ein weiterer Blick auf die Altersverteilung zeigt, dass ein Modelljahr mindestens 25 Jahre auf dem Markt bleibt bis sein Bestand unter 5% des Bestands im Jahr der ersten Zulassung liegt. Ferner zeigt die KBA-Statistik, dass der Anteil der Pkw mit einem Alter von über 30 Jahren stetig wächst. So repräsentiert der Bestand von ca. 500.000 Pkw (2015), die über 30 Jahre alt sind, ca. 1% der gesamten Pkw-Flotte in Deutschland. Davon

sind ca. 50% mit dem Status „Oldtimer“ gekennzeichnet. Der Oldtimer-Bestand (alle Fahrzeugarten, davon 89% Pkw) ist in Abbildung 21 dargestellt.

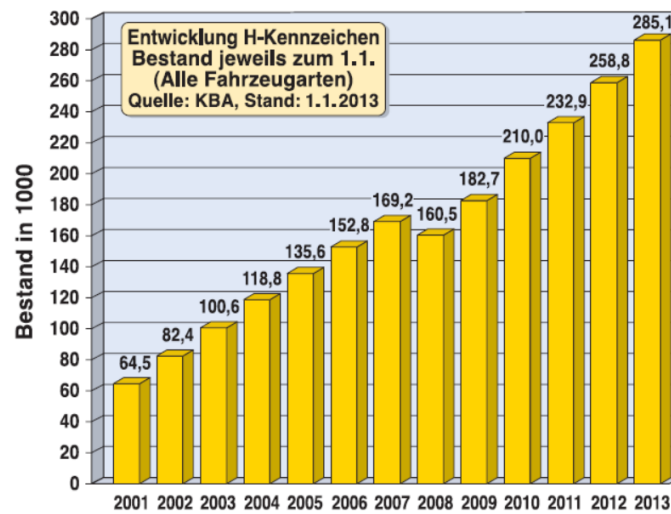


Abbildung 21 – Oldtimer Bestand in Deutschland (2001-2013) [9]

Um zu untersuchen, ob Fahrzeuge mit einem höheren Alter eine signifikante Fahrleistung auf den BAB erbringen, wurden Daten aus der Tankbucherhebung des MOP (Beschreibung der Erhebung im Abschnitt 3.4.1) analysiert. Aus der MOP-Stichprobe ist ersichtlich, dass Fahrzeuge mit einem höheren Alter eine deutlich geringere Fahrleistung aufweisen. Tabelle 8 zeigt die Fahrleistungen einer repräsentativen Stichprobe, differenziert nach dem Fahrzeugalter. In der Zusammenfassung wurden die Erhebungswellen zwischen 2002 und 2015 betrachtet, wobei die Jahresfahrleistung der Pkw von den Erhebungsteilnehmern abgeschätzt wird. Die Tabelle zeigt, dass Fahrzeuge mit einer geringeren Jahresfahrleistung auf der BAB deutlich unterrepräsentiert sind. Deshalb werden die Fahrzeuge im Teilmodell „Nutzung“ nicht betrachtet, wobei sie im Teilmodell „Altersverteilung“ für die Kalibrierung des Bestands nur bedingt mitberücksichtigt werden.

Tabelle 8 – Fahrleistung differenziert nach Fahrzeugalter [13]

	Fahrzeugalter [Jahre]					
	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25+
<b>Anzahl Beobachtungen</b>	3.472	3.584	2.148	754	172	57
<b>Frühjahrsmonatsfahrleistung</b>	1.360	1.111	932	786	659	380
<b>Jahresfahrleistung</b>	15.648	13.190	11.179	9.262	7.403	3.948

Die Prognose der Weiterentwicklung der deutschen Fahrzeugflotte bis zum Jahr 2050 wird anhand von Eckwerten (Pkw-Bestand, Durchschnittsalter, Lebenszyklus eines Modelljahres) und deren Entwicklung kalibriert. Somit sind vor allem folgende Rahmenbedingungen zu betrachten:

- Der gesamte Pkw-Bestand folgt dem KBA-Trend, erreicht aber seinen Höhepunkt im Jahr 2022.
- Die Anzahl der Neuzulassungen geht leicht zurück.
- Das Durchschnittsalter der Pkw-Flotte steigt mit 0,1 Jahren p.a.
- Ein Modelljahr bleibt maximal 40 Jahre im Bestand.

Abbildung 22 zeigt die resultierende Prognose des Pkw-Bestands in Deutschland zwischen den Jahren 2016-2050 (gelber Hintergrund) anhand des Trends aus den historischen KBA-Daten (weißer Hintergrund) und den angenommenen Rahmenbedingungen.

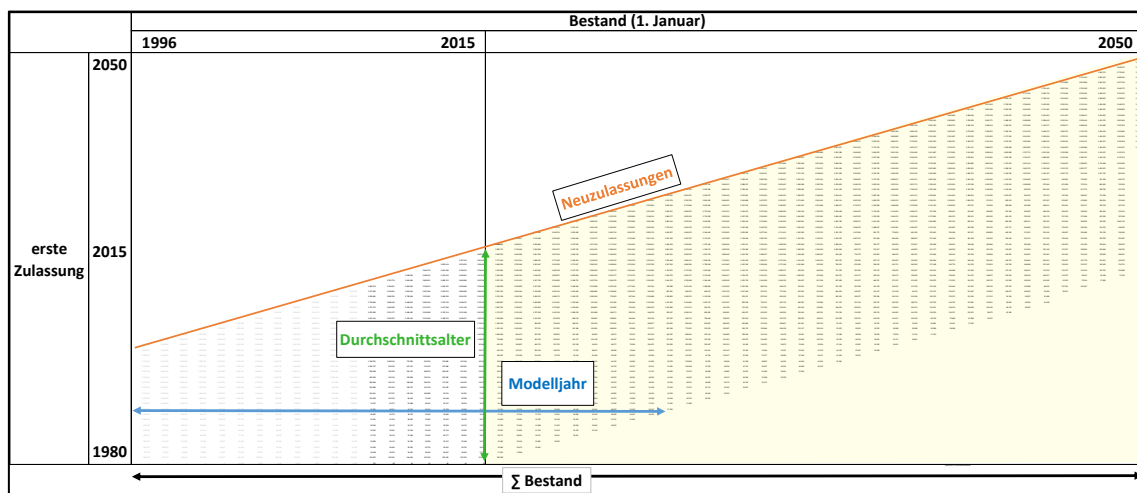


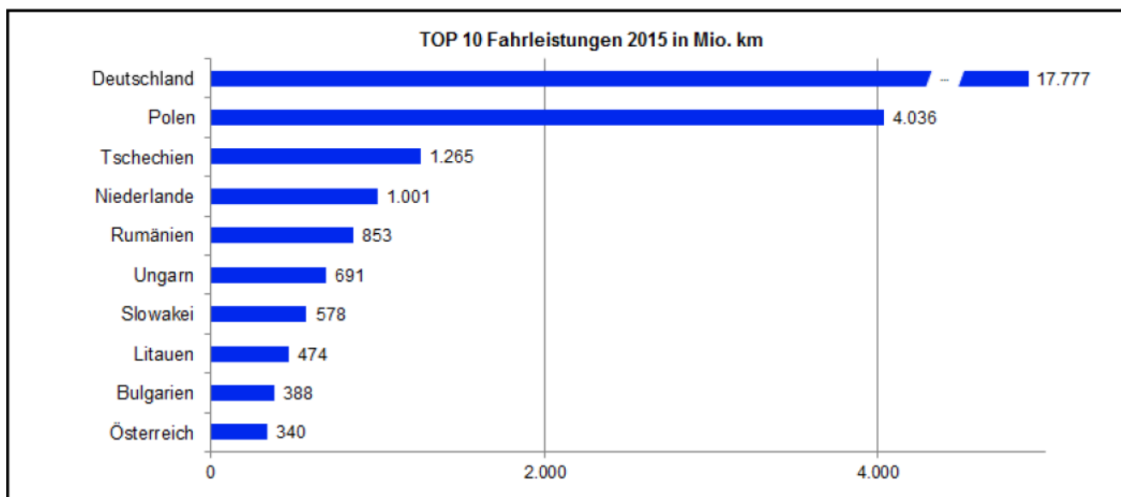
Abbildung 22 – verfügbare KBA-Daten (weiß) und Prognose (gelb) der Fahrzeugflotte in Deutschland (1980-2050)

### 3.2.2 Lkw-Flotte

Durch den hohen Anteil der ausländischen Lkw an der gesamten Lkw-Flotte auf den deutschen Fernstraßen ist hier eine komplexere Betrachtung der Fahrzeugzusammensetzung nötig. Da die KBA-Statistik über die in Deutschland fahrenden Lkw nur beschränkte Aussagekraft aufweist, wird im Modell zusätzlich die Mautstatistik des BAG verwendet, um die Entwicklung der Lkw-Flotte auf deutschen Fernstraßen zu prognostizieren. Dabei wird die Entwicklung in benachbarten Ländern, aus denen ein Großteil der Lkw auf deutschen Straßen stammt, berücksichtigt. Es ist zu betrachten, dass sich sowohl der Umfang des mautpflichtigen Netzes als auch die zulässigen Gesamtgewichte den mautpflichtigen Nutzfahrzeugen im Laufe der Zeit geändert haben. So sind ab 1.10.2015 außer den Nutzfahrzeugen mit zGG über 12t auch die Nutzfahrzeuge über 7,5t

zGG zu berücksichtigen. Weiter wurde eine Erweiterung des Netzes am 1.7.2015 um 1.100 km Bundesstraßen auf insgesamt 12.800 km BAB und 1.370 km autobahnähnlichen Bundesstraßen durchgeführt.

Abbildung 23 gibt die Fahrleistung der zehn leistungsstärksten Zulassungsstaaten (2015) anhand der BAG-Mautstatistik wieder. Die Mautstatistik zeigt, dass die Anteile der jährlichen Fahrleistungen von Lkw aus den EU-Beitrittsstaaten (2004) deutlich gestiegen sind (+11,6% zwischen 2007-2015).



**Abbildung 23** – Fahrleistung von mautpflichtigen Nutzfahrzeugen in Deutschland nach Zulassungsstaaten [10]

Die Differenzierung der Mautabgabe nach Emissionsklassen hat einen signifikanten Effekt auf die Erneuerung der Lkw-Flotte. In 10 Jahren (2005 – 2015) ist der Anteil der Lkw-Flotte auf mautpflichtigen Fernstraßen in Emissionsklasse S5 oder besser (EEV, S6) von 0% auf über 90% gestiegen (Abbildung 24). Im Lkw-Flottenmodell wird die Automatisierung in die Flotte für die deutschen und ausländischen Lkw mit gleicher Geschwindigkeit eingeführt. Als Begründung für die Annahme der gleichen Marktdurchdringung der Technologie in Deutschland und im Ausland dient die Emissionskennzahl, eine durchschnittliche höchstzulässige Schadstoffmenge auf einem vordefinierten Autobahnabschnitt. Sie ist ein Indikator für die Technik-Innovation. Die Statistik zur Emissionstechnik auf mautpflichtigen Straßen zeigt, dass die Emissionskennzahl der inländischen sowie der ausländischen Lkw-Flotte vergleichbar ist (Abbildung 25).



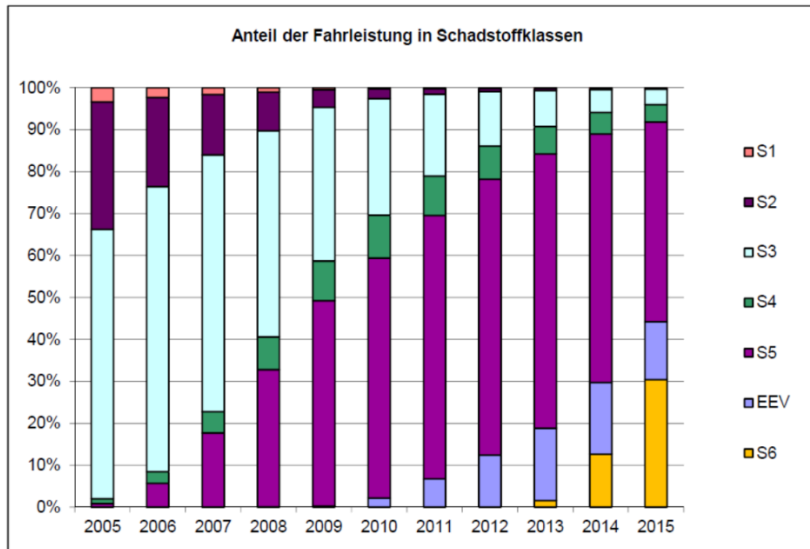


Abbildung 24 – Anteil der Fahrleistung in Schadstoffklassen [10]

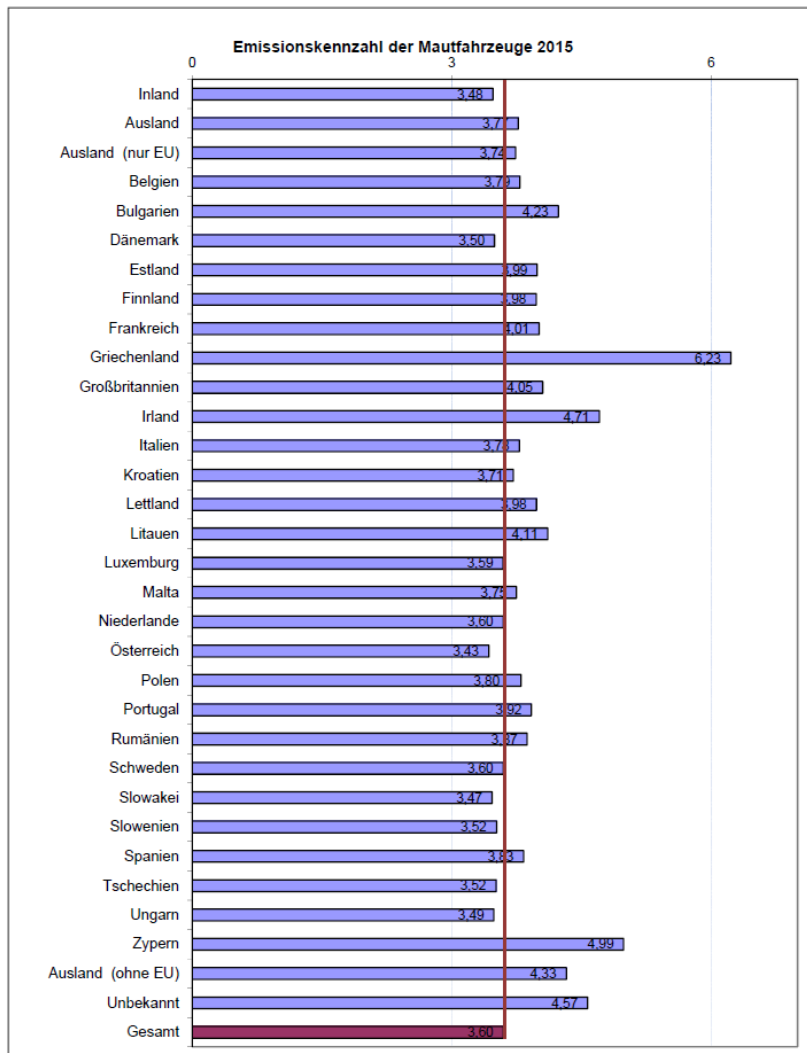


Abbildung 25 – Emissionskennzahl der Mautfahrzeuge (2015) [10]

Weil für die Ermittlung der Anteile von automatisierten Fahrzeugen der gleiche Modellansatz für Pkw- und Lkw-Segment nötig ist, wird auch der Lkw-Bestand in Deutschland prognostiziert. Im Anschluss wird der Lkw-Bestand anhand der Mautstatistik auf die Anzahl der Mautfahrzeuge skaliert. Ein Mautfahrzeug ist als Lkw definiert, der in einem Jahr mindestens einmal durch das Mautsystem in Deutschland erfasst wurde. Die Statistik der Lkw-Neuzulassungen zwischen den Jahren 1995-2015 (Abbildung 26) zeigt, dass eine genaue Vorhersage des Lkw-Bestands wegen seiner starken Abhängigkeit von der Wirtschaftslage kaum möglich ist.

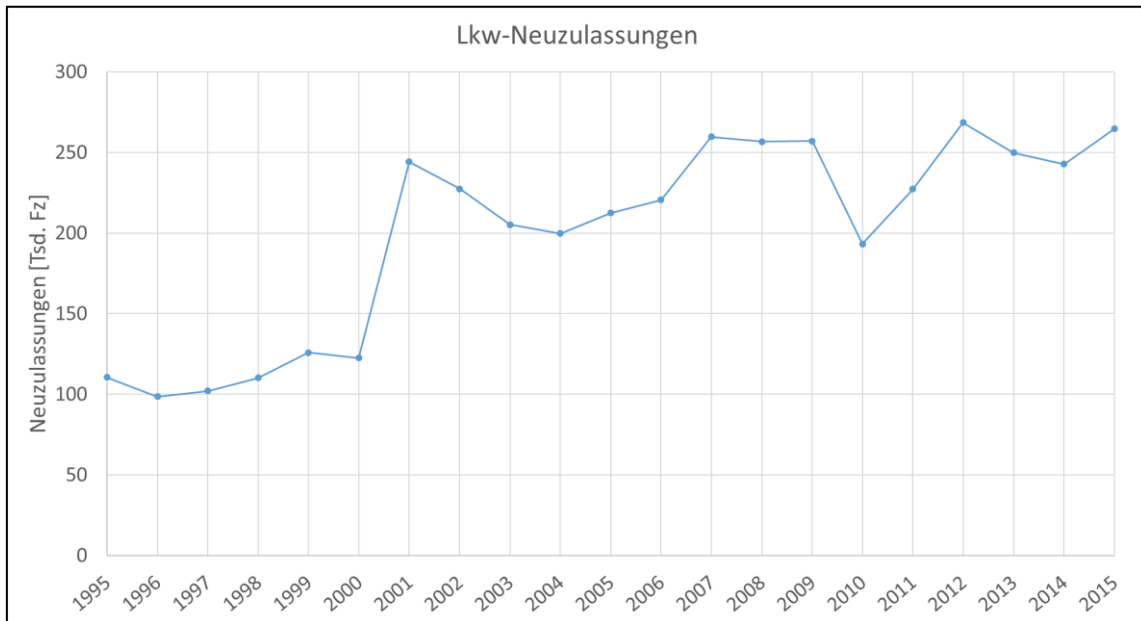


Abbildung 26 – Lkw-Neuzulassungen in Deutschland (1995-2015) [9]

Aufgrund des hohen Anteils von ausländischen Lkw in Deutschland wird die Wirtschaftsentwicklung in benachbarten Ländern, die einen hohen Lkw-Anteil in Deutschland haben, berücksichtigt. Tabelle 9 zeigt verschiedene Wirtschaftskennzahlen für die Länder Deutschland, Polen und Tschechien.

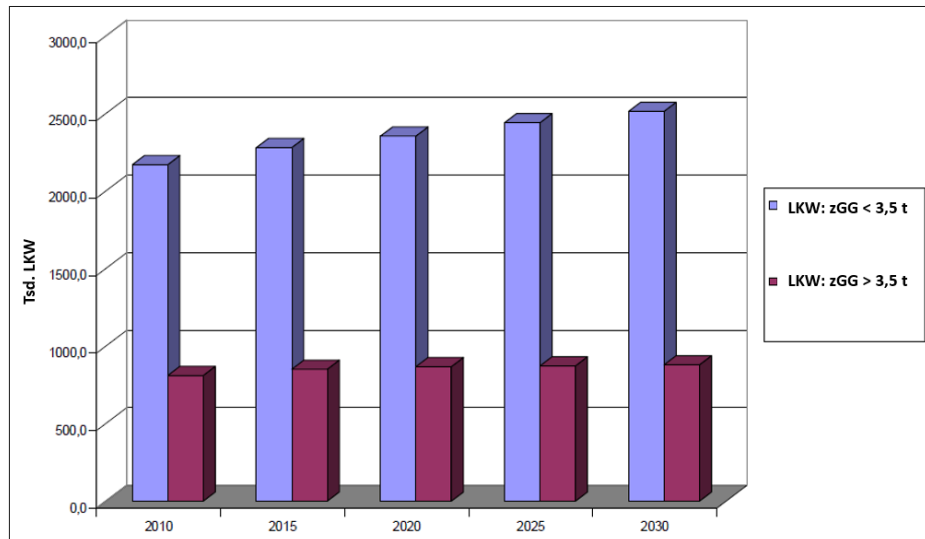
Tabelle 9 – gemittelte Wirtschaftsindikatoren p.a. in Jahren 2010-2014

Indikator / Land	Deutschland*	Polen **	Tschechien***
Reales BIP	+ 1,5 %	+ 2,9 %	+ 1,4 %
Lkw-Neuzulassungen	+ 3,3%	+ 9,1 %	+ 6,8 %
Güterverkehrsaufkommen	+ 2,6 %	+ 2,2 %	+ 2,8 %
Güterverkehrsleistung	- 0,3 %	+ 4,2 %	+ 0,1 %

\* [14], \*\* [15], \*\*\* [16]

Bis zum Jahr 2050 soll der Güterverkehr in Deutschland auf dem Verkehrsträger Straße um 0,8% p.a. zunehmen [17]. Der jährliche Zuwachs der Güterverkehrsleistung in Deutschland auf allen Verkehrsträgern wird auf 2% p.a. geschätzt, was mit der Entwicklung in der gesamten EU-28 bis

2030 (+ 1,9%) vergleichbar ist [17]. Der Lkw-Bestand in Deutschland steigt seit 2010 durchschnittlich um 2,1% p.a. [9]. In Polen wird ein Zuwachs des Lkw-Bestands zwischen 2010 und 2030 um 16% (unter 3,5t) bzw. 9% (über 3,5t) prognostiziert [18]. Werden die Prozentpunkte über den absoluten Lkw-Bestand und Zeitraum gemittelt, ergibt sich ein Zuwachs von 0,7% p.a.



**Abbildung 27** – Lkw-Bestand in Polen differenziert nach dem zulässigen Gesamtgewicht: unter 3,5 t (lila), über 3,5 t (blau) [18]

Im Flottenmodell wird ein linearer Zuwachs des Lkw-Bestands in Deutschland angenommen. Dieser Zuwachs ist vergleichbar mit dem Zuwachs des Güterverkehrsaufkommens (+0,8%) und repräsentiert somit einen stetigen und moderaten Zuwachs des Lkw-Bestands in Deutschland (Abbildung 28).

Um den Anteil des gesamten Lkw-Bestands auf den deutschen mautpflichtigen Straßen festzustellen, wird der Lkw-Bestand auf die erfasste Anzahl von Mautfahrzeugen skaliert. Aus der Mautstatistik geht hervor, dass 60% der Fahrleistung auf den mautpflichtigen Straßen durch Mautfahrzeuge aus dem Inland erbracht wurde. Dieser Fahrleistungsanteil wurde aber nur durch insgesamt 20% der Mautfahrzeuge realisiert, d.h. die restlichen 40% der Fahrleistung wurden von 80% der Mautfahrzeuge zurückgelegt. Um möglichst eine genaue Abbildung der Flottenzusammensetzung auf deutschen Fernstraßen zu modellieren, wird diese Aufteilung im Modell folgendermaßen berücksichtigt: unter der Annahme der gleichen technischen Ausstattung der inländischen und ausländischen Lkw-Flotte werden beide Teile zusammenaddiert und dem gesamten Anteil der Mautfahrzeuge in Deutschland zugerechnet. Dieser Anteil konvergiert zu 50% und wird in der Lkw-Bestandsprognose bis 2050 als Konstante angenommen. Abbildung 28 zeigt die angenommene Entwicklung des Lkw- bzw. Mautfahrzeug-Bestands in Deutschland.

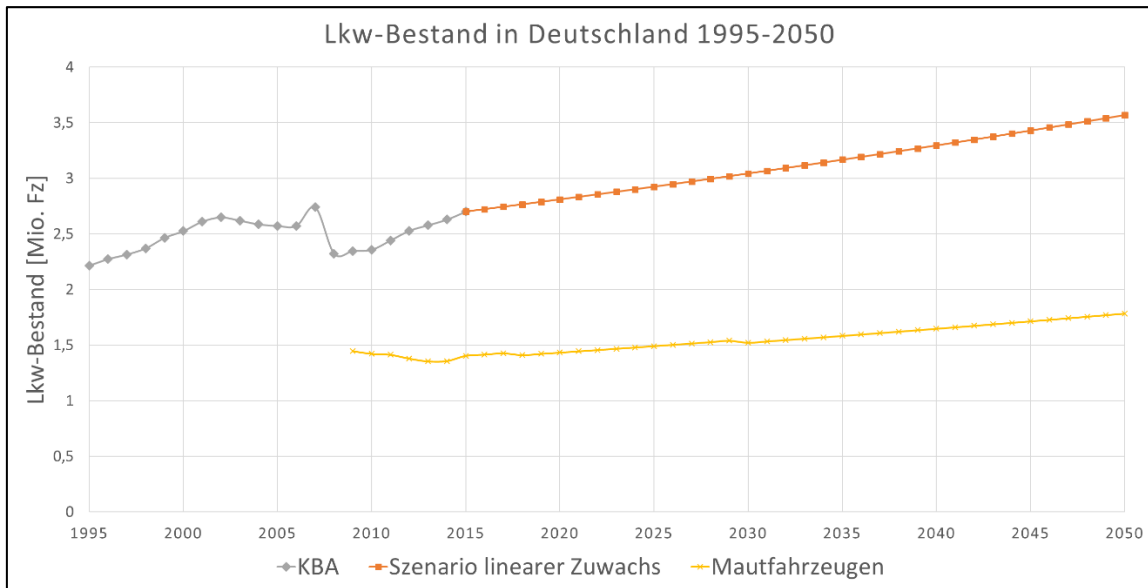


Abbildung 28 – Lkw-Bestand in Deutschland (1995-2050)

Schließlich wird die Alterung der Mautfahrzeug-Flotte unter der Berücksichtigung des voraussichtlichen Lkw-Bestands, des Durchschnittsalters der Flotte und der Verweildauer eines Modelljahres am Markt prognostiziert. Das Durchschnittsalter der Lkw-Flotte in Deutschland (7,7 Jahre in 2014) steigt um 0,1 Jahre p.a. Der Bestand eines Modelljahres aller Lkw wird nach 25 Jahren vernachlässigbar (unter 1%), wobei die Lkw auf mautpflichtigen Straßen i.d.R. schon nach 10 Jahren ausgemustert werden. Abbildung 29 stellt die Zusammensetzung der Lkw-Flotte und der wichtigsten Rahmenbedingungen dar.

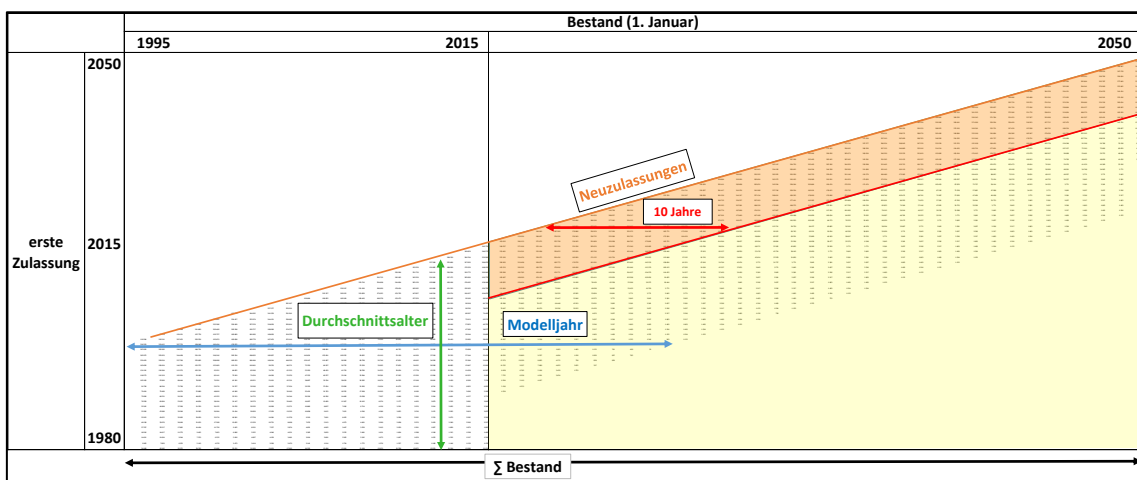


Abbildung 29 – verfügbare KBA-Daten (weiß) und Prognose (gelb) der Mautfahrzeuge in Deutschland (1980 – 2050)

### 3.3 Verfügbarkeit von HAF in Neufahrzeugen

Für die Einführung der neuen Technologien in das Fahrzeugflottenmodell werden Prognosen und Einführungsszenarien aus Industrie und Forschung verwendet, um den Zeitpunkt der Einführung der Assistenzsysteme festzulegen. Das hier zu Grunde gelegte Einführungsjahr ergibt aus einer Zusammenführung der Einführungsszenarien aller relevanten Studien. Als Grundlagen dienen die Roadmaps des VDA und die Studie der Arbeitsgruppe Connectivity and Automated Driving des European Road Transport Research Advisory Council [19]. Durch die Modellierung der Altersverteilung und des Fahrzeugbestandes ergibt sich mit der Einführung von Assistenzsystemen und der Hochautomatisierung in neuzugelassenen Fahrzeugen der Durchdringungsgrad in Deutschland. Um die Anteile der Assistenzsysteme in Neuzulassungen abschätzen zu können, werden Erkenntnisse aus der Einführung ähnlicher Assistenzsysteme in der Vergangenheit zu Rate gezogen. Hier dienen vor allem Assistenzsysteme wie ABS, ESP oder ACC als Beispiel (Abbildung 30). Hat die Marktdurchdringung von ABS innerhalb von 20 Jahren in West-Europa einen Wert von 40% erreicht, hat ESP den gleichen Wert in nur 10 Jahren erreicht [20]. Da es sich aber im Fall von ABS und ESP um Assistenzsysteme handelt, die ab einem bestimmten Zeitpunkt von der Gesetzgebung vorgeschrieben wurden (ABS: 2004, ESP: 2014), ist eine direkte Übertragung dieser Werte zu optimistisch.

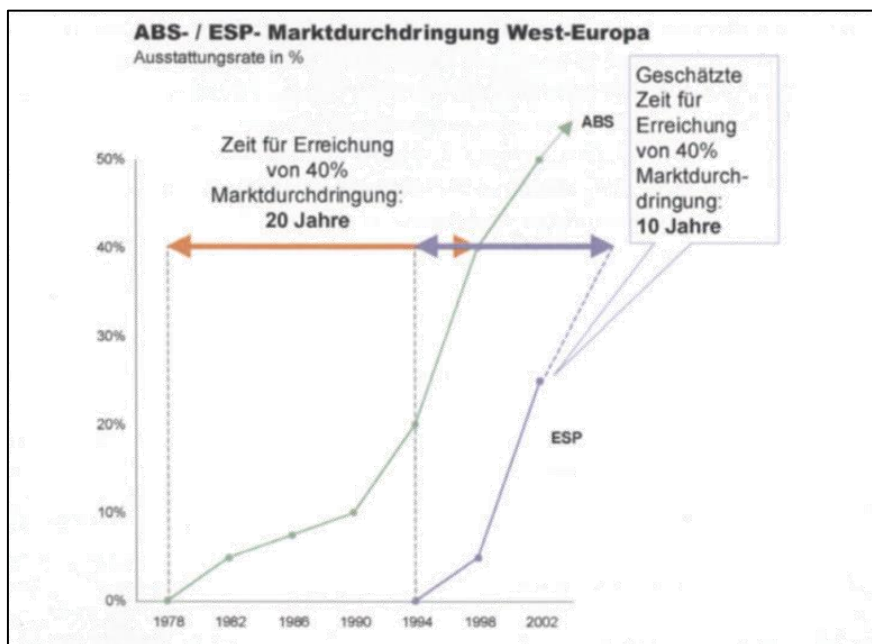


Abbildung 30 – ABS- / ESP- Marktdurchdringung in West-Europa [20]

### 3.3.1 Pkw-Flotte

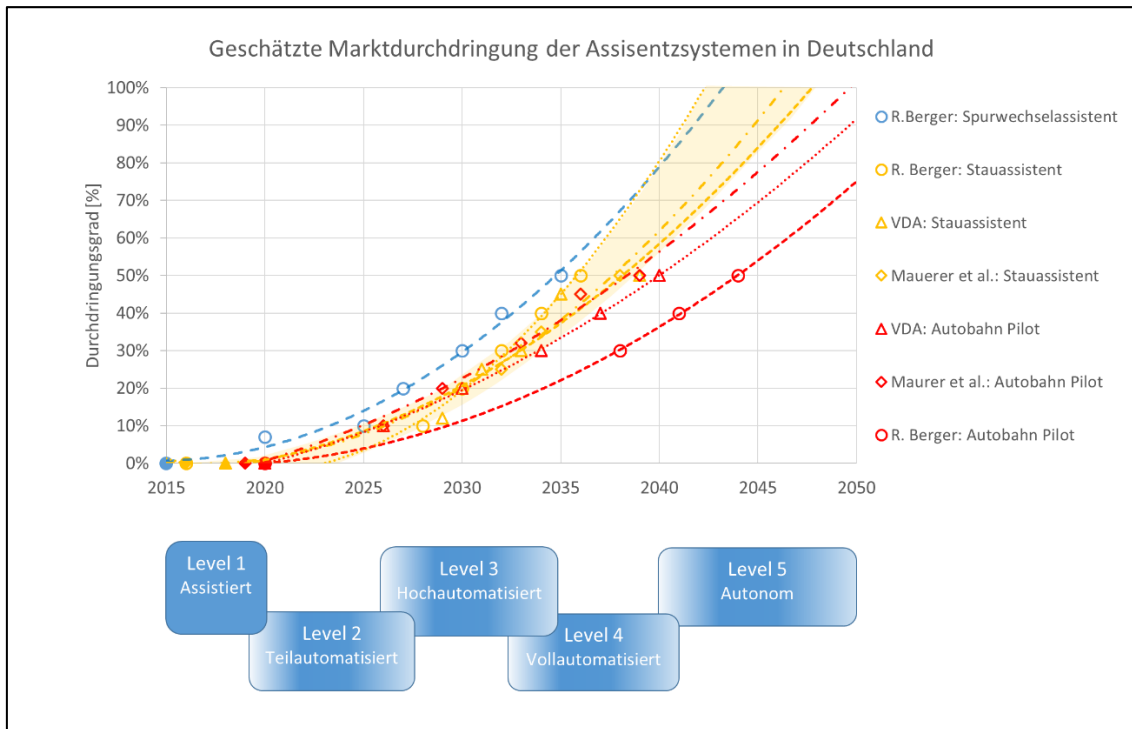
Als erster Schritt werden die einzelnen Assistenzsysteme den Automatisierungsstufen „Normalfahrer“, „teilautomatisiertes Fahren (TAF)“, „hochautomatisiertes Fahren (HAF)“ und „kommunizierendes hochautomatisiertes Fahren (kHAF)“ nach Definition des generischen AF in Abschnitt 2.1.1 zugeordnet. Tabelle 10 zeigt die Zuordnung der Technologie zu den Automatisierungsstufen.

**Tabelle 10** – Zuordnung der Assistenzsysteme zu den Automatisierungsstufen

Stufe	Automatisierung	Technologie
Normalfahrer	-	-
TAF	Längsführung	ACC, Stauassistent
HAF	Längs- und Querführung	ACC, Stauassistent, Lane Change Assist
kHAF	Längs- und Querführung, Kommunikation	CACC, Lane Change Assist, C2C

Grundsätzlich wird angenommen, dass die Einführung von Assistenzsystemen im Markt einem Top-down-Ansatz folgt, d.h. die Oberklasse wird am schnellsten mit Assistenzsystemen ausgestattet. Für diesen Zweck wurde die deutsche Pkw-Flotte in drei Pkw-Segmenten (Ober-, Mittel- und Kompaktsegment) aggregiert, um eine vereinfachte Dynamisierung der Markteinführung durchzuführen. Die jeweiligen Segmente repräsentieren nach KBA-Statistik 19,2% (Obersegment), 34,6% (Mittelsegment) und 46,2% (Kompaktsegment) des gesamten Pkw-Bestands in Deutschland. Es wird außerdem angenommen, dass die Automatisierung im gesamten Prognosezeitraum nicht gesetzlich vorgeschrieben wird und somit die Einführungskurve keinen signifikanten Knickpunkt ausweist.

Die Prozentanteile der Durchdringung der Assistenzsysteme wurden anhand der verfügbaren Prognosen ermittelt bzw. aus der Einführung von ähnlichen Assistenzsystemen in der Vergangenheit abgeleitet. Aus Abbildung 31 kann beispielsweise die Entwicklung der Marktdurchdringung des Assistenzsystems „Stauassistent“ entnommen werden, womit der prozentuale Anteil der Technologie nach 10 Jahren seit der Einführung im Jahr 2018 ca. 10% erreicht, im Jahr 2035 ca. 30% usw. Im Durchschnitt liegen die Einführungsraten der Assistenzsysteme in Rahmen der Automatisierung (z.B. ACC 2% p.a.) unter der Einführungsrate von Assistenzsystemen wie ABS (2,5% p.a.) oder ESP (3,5% p.a.), da es sich (zumindest in absehbarer Zukunft) um eine optionale Fahrzeugausstattung handelt.



**Abbildung 31** – Geschätzte Marktdurchdringung der einzelnen Assistenzsysteme in Deutschland [21], [22]

Tabelle 11 stellt eine Übersicht der Marktdurchdringung aller Assistenzsysteme und die daraus resultierende Marktdurchdringung der einzelnen Automatisierungsstufen dar. Die Marktdurchdringung der Automatisierungsstufen wurde durch eine Minimumbildung der einzelnen Assistenzsysteme modelliert und nimmt demzufolge an, dass eine Automatisierungsstufe erst als erreicht gilt, wenn alle dafür vorgesehenen Assistenzsysteme im Fahrzeug vorhanden sind.

**Tabelle 11** – Geschätzte Marktdurchdringung der PKW-Assistenzsysteme in Deutschland

Stufe	Funktion / Segment		Jahr							
			2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Normalfahrer	Normalfahrer-Durchdringung		100%	96%	88%	85%	75%	56%	42%	27%
TAF	ACC		5%	10%	14%	19%	32%	48%	60%	78%
	Stauassistent		0%	4%	12%	15%	25%	44%	58%	73%
TAF-Durchdringung			0%	4%	12%	15%	25%	44%	58%	73%
HAF	Highway Chauffeur (reaktiv)	ACC	5%	10%	14%	19%	32%	48%	60%	78%
		Stauassistent	0%	4%	12%	15%	25%	44%	58%	73%
		Lane Change Assist	0%	2%	7%	15%	20%	35%	45%	55%
HAF-Durchdringung			0%	2%	7%	12%	20%	35%	45%	55%
kHAF	Highway Chauffeur (proaktiv)	CACC	0%	1%	5%	10%	20%	30%	40%	50%
		Lane Change Assist	0%	2%	7%	15%	20%	35%	45%	55%
		C2X	5%	10%	25%	40%	60%	80%	100%	100%
		kHAF-Durchdringung		0%	1%	5%	10%	20%	30%	40%

Anhand von Tabelle 11 können die beide Teilmodelle „Altersverteilung“ und „Verfügbarkeit von HAF“ verknüpft werden. Sind der Zeitpunkt der Technologieeinführung und die zeitliche Entwicklung bekannt, kann die Technologie in den Pkw-Bestand eingeführt werden. Durch die Alte-

rung bzw. Erneuerung der Pkw-Flotte wird sich die Technologie automatisch durch die Flottenzusammensetzung propagieren. Abbildung 32 zeigt die resultierende Abschätzung der Einführung der Automatisierung in absoluten Zahlen des Pkw-Bestands in der jeweiligen Automatisierungsstufe. Der aggregierte Verlauf der Ausstattung ist in Tabelle 12 zusammengefasst. In diesem Verlauf beinhaltet eine obere Automatisierungsstufe immer alle unteren Stufen.

**Tabelle 12** – Geschätzte Durchdringung der Automatisierungsstufen in der deutschen Pkw-Flotte

Verlauf der Ausstattung								
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Normalfahrer	100%	98%	86%	76%	57%	34%	23%	13%
TAF	0%	1%	7%	10%	17%	27%	31%	36%
HAF	0%	1%	4%	8%	13%	21%	24%	27%
kHAF	0%	0%	3%	6%	13%	18%	22%	24%

Der nach Automatisierungsstufen differenzierte Ausstattungsgrad dient als Input für die Fahrzeugzusammensetzung in der VISSIM Simulation. Sollten sich in den kommenden Jahren einige Annahmen zur geschätzten Marktdurchdringung wegen neuen Entwicklungen der Fahrzeugtechnologie bzw. Gesetzgebung ändern, sind diese Änderungen modelltechnisch leicht umzusetzen, was eine schnelle Neuberechnung des Ausstattungsgrads ermöglicht.



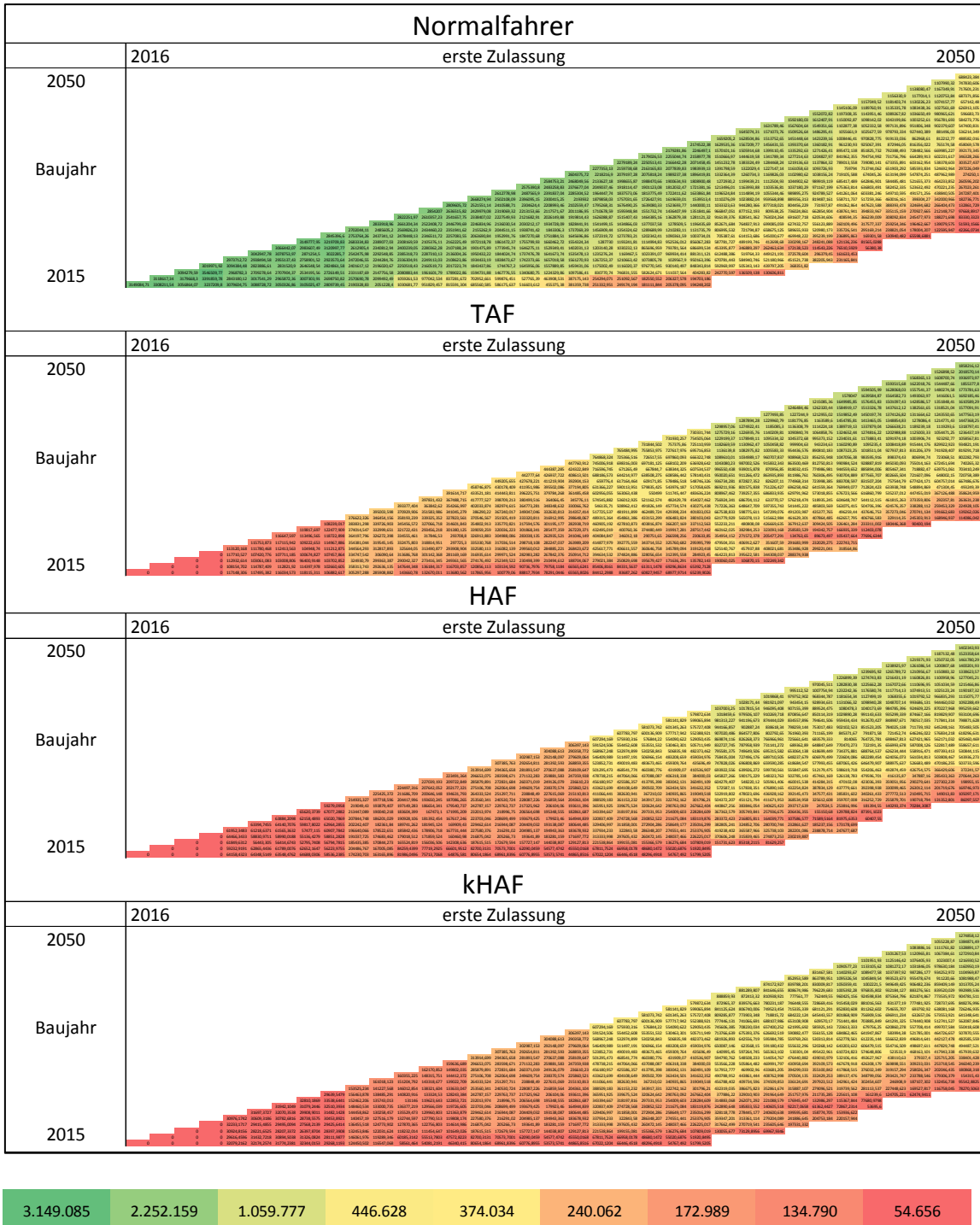


Abbildung 32 – Durchdringung der Automatisierung im Pkw-Bestand

### 3.3.2 Lkw-Flotte

Die Einführung der Automatisierung in der Lkw-Flotte folgt prinzipiell dem Mechanismus aus der Modellierung der Pkw-Flotte. Allerdings wird die Marktdurchdringung von Assistenzsystemen im Vergleich zum Pkw-Segment als schneller eingeschätzt. Dies ist damit zu begründen, dass der Gesetzgeber oft entsprechend des technischen Fortschritts eine verbindliche Einführung von sicherheitskritischen Assistenzsystemen bei der Erstzulassung vorschreibt. Als Beispiel gelten hier vor allem das Antiblockiersystem (1991), das elektronische Stabilitätsprogramm (2014) oder der Notbremsassistent (2015). Um das Pkw- und Lkw-Flottenmodell miteinander kompatibel zu gestalten, werden alle vier Automatisierungsstufen gleich definiert, wobei in der Stufe kHAF die CACC Technologie mit der Funktion kooperative Kolonnenfahrt ersetzt wurde. Die geschätzten Marktdurchdringungen der Lkw-Assistenzsysteme ist in Tabelle 13 dargestellt. Mit 2,85% p.a. liegt beispielsweise die Einführungsrate von ACC leicht über die Einführungsrate von ABS (2,5%).

**Tabelle 13** – Geschätzte Marktdurchdringung der Lkw-Assistenzsysteme in der Lkw-Flotte

Stufe	Funktion / Segment		Jahr							
			2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Normalfahrer	Normalfahrer-Durchdringung		100%	85%	70%	40%	30%	10%	5%	0%
TAF	ACC		5%	20%	40%	70%	80%	90%	95%	100%
	Stauassistent		0%	15%	30%	60%	70%	90%	95%	100%
	TAF-Durchdringung		0%	15%	30%	60%	70%	90%	95%	100%
HAF	Highway Chauffeur (reaktiv)	ACC	5%	20%	40%	70%	80%	90%	95%	100%
		Stauassistent	0%	15%	30%	60%	70%	90%	95%	100%
		Lane Change Assist	0%	10%	25%	35%	50%	65%	80%	90%
	HAF-Durchdringung		0%	10%	25%	35%	50%	65%	80%	90%
kHAF	Highway Chauffeur (proaktiv)	Koop. Kolonnenfahrt	0%	5%	10%	15%	25%	35%	60%	75%
		Lane Change Assist	0%	10%	25%	35%	50%	65%	80%	90%
		C2X	5%	15%	25%	35%	60%	80%	95%	95%
	kHAF-Durchdringung		0%	5%	10%	15%	25%	35%	60%	75%

Die Einführung der Automatisierung in den modellierten Lkw-Bestand ergibt eine Verteilung der Automatisierungsstufen in Prozentanteilen (Tabelle 14) und in einem absoluten Bestand (Abbildung 33). Die Durchdringung der Lkw-Automatisierung nimmt bis zum Prognosejahr 2050 deutlich zu, wobei 98% der Lkw-Flotte im Jahr 2050 mindestens einer Automatisierungsstufe zuzuordnen ist.

**Tabelle 14** – Geschätzte Durchdringung der Automatisierungsstufen in der Lkw-Flotte

		Verlauf der Ausstattung							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Normalfahrer	100%	87%	79%	55%	28%	17%	5%	2%	
TAF	0%	6%	9%	21%	40%	40%	45%	29%	
HAF	0%	4%	9%	17%	23%	29%	32%	25%	
kHAF	0%	3%	3%	7%	9%	14%	18%	44%	

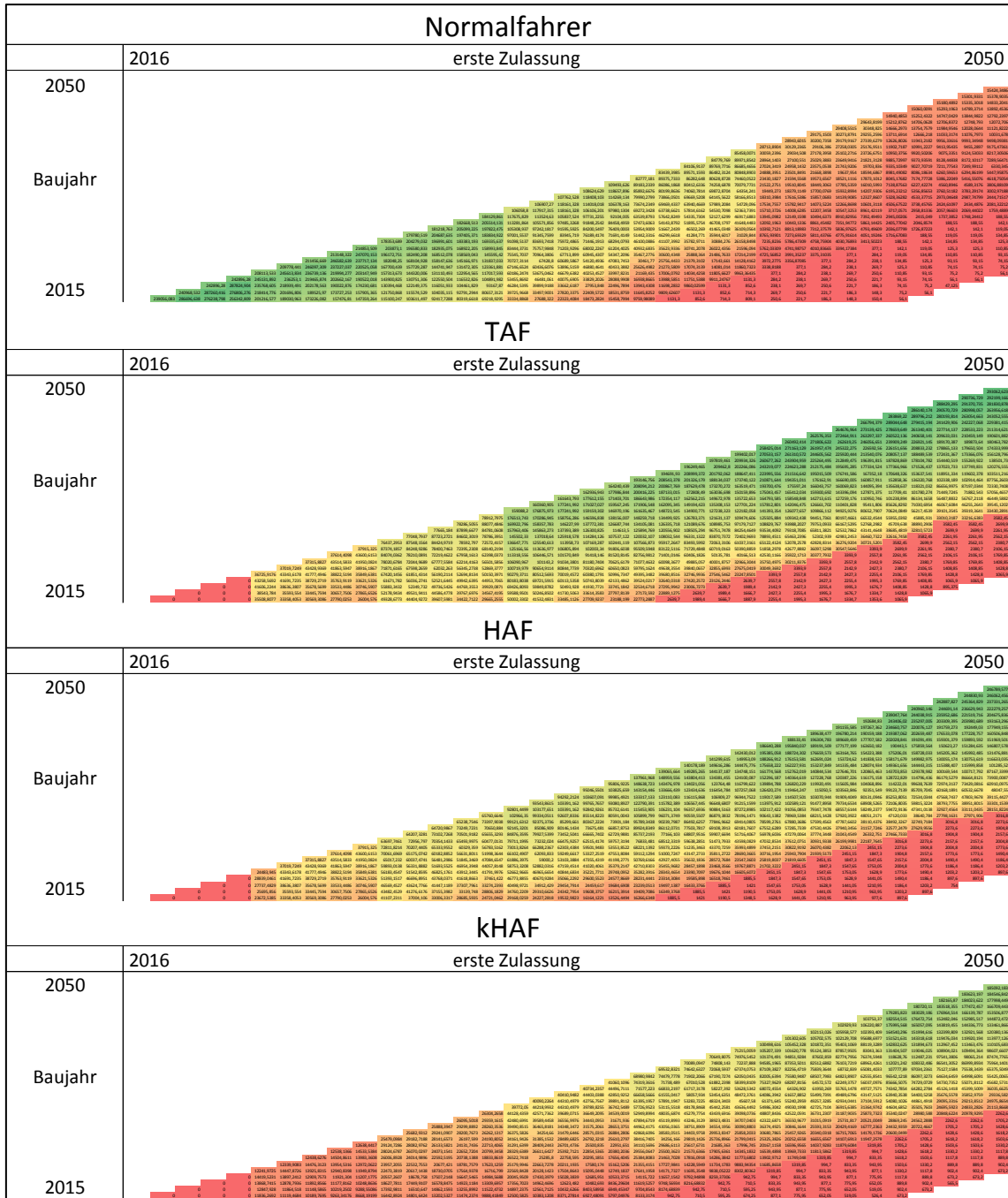


Abbildung 33 – Durchdringung der Automatisierung in Lkw-Bestand



### 3.4 Nutzungsprofile

Bisher betrachtete das Fahrzeugflottenmodell die Aufteilung der automatisierten und konventionellen Fahrzeuge auf das gesamte Straßennetz in Deutschland. Es wird angenommen, dass die automatisierten Fahrzeuge auf dem Fernstraßennetz im Vergleich zum Rest des Straßennetzes in Deutschland überrepräsentiert werden. Durch eine Analyse von Nutzerprofilen anhand der verfügbaren Daten aus Verkehrserhebungen können Aussagen über die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen im Fernstraßennetz getroffen werden. Dabei wird der im vorherigen Teilmodell definierte Anteil von automatisierten Pkw zu bestimmten Personengruppen und deren typischen Jahresfahrleistungen zugeordnet. Das Clustering der Pkw-Flotte nach Jahresfahrleistung erlaubt im weiteren Modellierungsschritt eine Zuordnung der automatisierten Fahrzeugen zur Bevölkerung und deren Nutzungsprofilen, um Zuschläge für die Durchdringung der Automatisierung auf der Bundesautobahn abzuleiten.

Im Lkw-Segment ist aus der Mautstatistik ersichtlich, dass die mittlere Streckenleistung einer Mautfahrt im deutschen BAB Netz 72,2 km beträgt [10]. Da in der Mautstatistik keine weitere Differenzierung der Mautfahrten nach Streckenleistungen vorliegt, wird die Aufteilung der Automatisierung über die verschiedenen Fahrleistungsklassen pauschal angenommen. Als Ergebnis wird im Lkw-Segment eine gleichmäßige Verteilung der Flotte im Netz getroffen.

#### 3.4.1 Pkw-Nutzung in Deutschland

Die Datengrundlage der Untersuchung der Pkw-Nutzung in Deutschland stammt aus der Verkehrserhebung Deutsches Mobilitätspanel (MOP) [13], die seit 1994 am Institut für Verkehrsweisen des KIT Informationen zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung in Deutschland sammelt. Im Rahmen der Erhebung werden Haushalte zu ihrem Mobilitätsverhalten im Alltag und zu ihrer Pkw-Nutzung befragt. Die erhobenen Daten werden plausibilisiert und gewichtet und aus dieser Information werden Statistiken über das Mobilitätsverhalten, u.a. zur Pkw-Nutzung, aus einer repräsentativen Stichprobe in Deutschland erstellt. In einem letzten Schritt werden die Daten auf die gesamte deutsche Bevölkerung hochgerechnet. Eine Erweiterung der Datengrundlage stellt das Modell CUMILE [23] vor, das die Nutzung der Pkw im MOP-Tankbuchdatensatz über ein Jahr modelliert. Modelliert werden Tagesfahrleistungen der deutschen Pkw-Flotte, wobei die Soziodemographie der Pkw-Nutzer und Eigenschaften der Pkw aus der Erhebung bekannt sind. Das Modell wird kalibriert, sodass die Jahresfahrleistung der gesamten Pkw-Flotte zur mittleren Jahresfahrleistung in Deutschland (14.074 km, 2015) nach KBA [24] konvergiert. Dies erlaubt unter Berücksichtigung von einigen Annahmen (Abschnitt 3.4.2) eine Aufteilung der automatisierten Fahrzeuge auf die Fahrerpopulation.

Die Tagesfahrleistung der (hochgerechneten) deutschen Pkw-Flotte an einem Tag ist in Abbildung 34 visualisiert. Im Straßennetzmodell VALIDATE wird die Verkehrsnachfrage für einen

durchschnittlichen Tag (Di-Do) modelliert und umgelegt. Um die Rahmenbedingungen ähnlich zu gestalten, werden auch die in CUMILE modellierten Tagesfahrleistungen für den Di-Do Verkehr gefiltert. Die Aufteilung der modellierten Tagesfahrleistungen auf den deutschen Fernstraßen ist in Abbildung 35 dargestellt. Die durchschnittliche Tagesfahrleistung auf der Bundesautobahn beträgt 88 km.

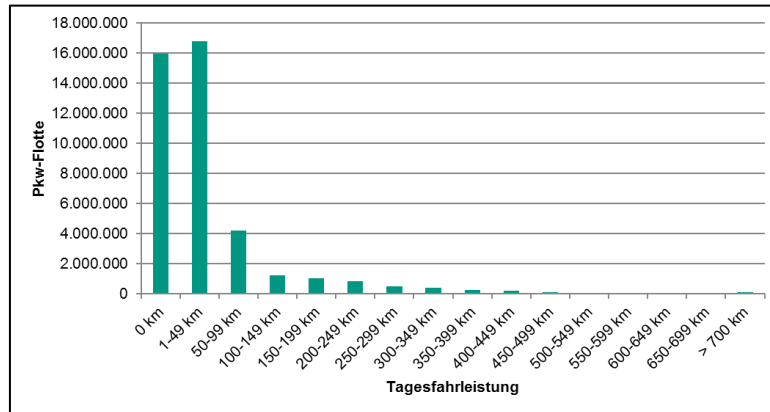


Abbildung 34 – Tagesfahrleistung der Pkw-Flotte in Deutschland (CUMILE)

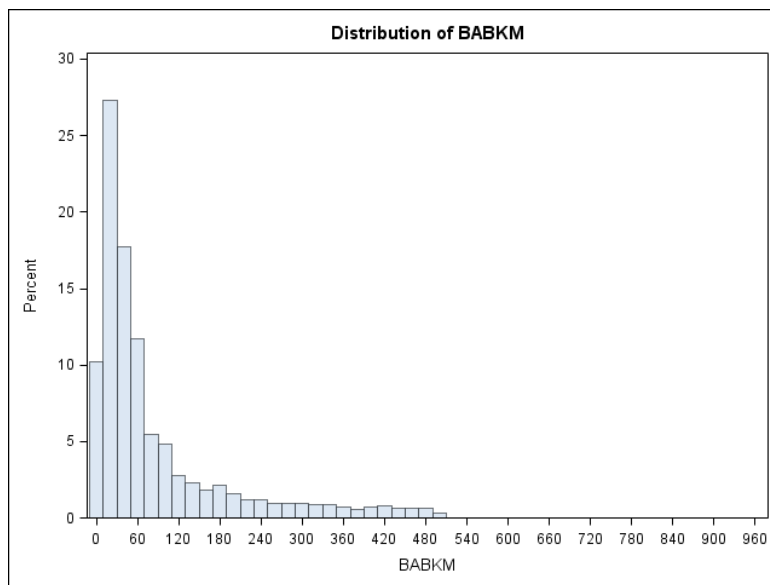
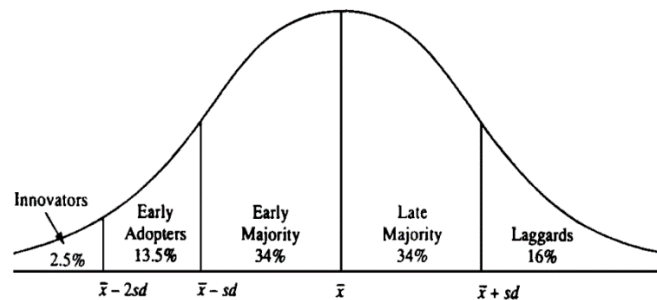


Abbildung 35 – Tagesfahrleistung der Pkw-Flotte im Di-Do Verkehr in Deutschland (CUMILE)

### 3.4.2 Zuordnung der automatisierten Fahrzeuge zur MOP-Stichprobe

Im nächsten Schritt wird der Anteil der Fahrleistung, die von automatisierten bzw. konventionellen Fahrzeugen auf den Fernstraßen erbracht wird, abgeleitet. Die Ableitung erfolgt aus Fahrzeugnutzungsprofilen anhand der soziodemographischen Daten einer repräsentativen Stichprobe der Einwohner von Deutschland (MOP). Der Kern der Ableitung besteht aus der Bildung von Personengruppen, denen die Nutzung der automatisierten Fahrzeuge zugeordnet wird. Für

die Abgrenzung der Personengruppen wird eine Aufteilung der Bevölkerung laut der Adoptions-  
theorie nach Rogers [25] verwendet. Diese Theorie beschäftigt sich mit der Modellierung der  
zeitlichen Faktoren, die zu einer Übernahme oder Ablehnung einer technischen Innovation füh-  
ren. Abbildung 36 zeigt die Aufteilung der Personengruppen nach dem Grad ihrer Innovativität.



**Abbildung 36** – Personengruppen nach dem Grad ihrer Innovativität [25]

Es wird angenommen, dass die jeweiligen Personengruppen unterschiedliche Tages- bzw. Jah-  
resfahrleistungen aufweisen. Durch eine zeitlich verschobene Adoption der Technologie durch  
verschiedene Personengruppen lassen sich die Anteile der Fahrleistungen von automatisierten  
und konventionellen Fahrzeugen ableiten. Eine Verknüpfung zwischen den Nutzungsprofilen  
und dem Flottenbestand entsteht durch die Umrechnung der AF/KF Flottenanteile für das je-  
weilige Prognosejahr.

**Tabelle 15** – Übernahmezeitpunkt der Technologie von verschiedenen Personengruppen

Personengruppe	Jahr der AF Adoption	Kumulativer Anteil (Rogers)
<i>Innovators</i>	2020	2,5%
<i>Early Adopters</i>	2025	16%
<i>Early Majority</i>	2035	50%
<i>Late Majority</i>	2045	84%
<i>Laggards</i>	> 2050	90 - 100%

Um die durchschnittliche Tagesfahrleistung einer bestimmten Personengruppe ableiten zu kön-  
nen, werden die Probanden in der MOP-Stichprobe nach ihrem Ähnlichkeitsmaß analysiert und  
einer der oben genannten Personengruppen zugeordnet. Das Ähnlichkeitsmaß wird anhand von  
berichteten Daten über den Haushalt (verfügbare Pkw, Haushaltseinkommen) und Pkw (Jahres-  
fahrleistung) abgeleitet. Tabelle 16 zeigt die regelbasierte Zuordnung der automatisierten Fahr-  
zeuge zur MOP-Stichprobe und die resultierende Abweichungen zu den Zielwerten nach der  
Adoptionstheorie. Die MOP-Stichprobe beinhaltet 5.417 Pkw wobei der Umfang der Stichprobe  
mit einem kompletten Datensatz den ausgewählten Attributen (Jahresfahrleistung, Anzahl Pkw  
im Haushalt und Haushaltseinkommen) 4.551 Pkw beträgt. Der regelbasierte Ansatz nimmt an,  
dass sich der Zeitpunkt der Übernahme der Technologie proportional mit der Absenkung der

Jahresfahrleistung und des Haushaltseinkommens sowie mit einer geringeren Anzahl der verfügbaren Pkw im Haushalt verschiebt. Letztlich minimiert der Ansatz die Differenz zwischen der Summe der MOP-automatisierten Flotte und dem Zielwert nach der Adoptionstheorie. Aus der Zuordnung ergibt sich die Zusammensetzung der MOP-automatisierten Flotte im gesamten deutschen Straßennetz bis Horizontjahr 2050 und darüber hinaus.

Weil aus den Ergebnissen der Simulation (Anhang I) ersichtlich ist, dass die Auswirkungen der TAF- und HAF-Automatisierungsstufen näherungsweise ähnlich verlaufen, wird in der folgenden Zuordnung der Automatisierung zur MOP-Flotte auf die Unterscheidung verzichtet. Beide Automatisierungsstufen werden folglich als TAF/HAF-Stufe aufgeführt.

**Tabelle 16** – Übersicht der regelbasierten Zuordnung der Automatisierung zur MOP-Flotte

Attribut	Stufe	2015	2020	2025	2035	2045	> 2050
Jahresfahrleistung [km]	<i>kHAF</i>	> 40.000	> 20.000	> 17.000	> 14.000	> 10.000	> 9.000
	<i>TAF/HAF</i>	> 30.000	> 15.000	> 10.000	> 9.000	> 4.000	> 3.000
<i>UND</i>							
Anzahl PKWs im Haushalt [-]	<i>kHAF</i>	> 2	> 2	> 2	> 0	> 0	> 0
	<i>TAF/HAF</i>	> 1	> 1	> 1	> 0	> 0	> 0
<i>UND</i>							
Haushaltseinkommen [€]	<i>kHAF</i>	> 3.500	> 3.500	> 3.500	> 3.000	> 3.000	> 3.000
	<i>TAF/HAF</i>	3.000 - 3.500	3.000 - 3.500	2.000 - 3.500	1.500 - 3.500	1.000 - 3.500	500 - 3.500
<i>ELSE</i>							
<i>Normalfahrer</i>							
MOP-Stichprobe (Umfang 4.551 PKWs)	<i>kHAF</i>	0%	1%	6%	12%	21%	25%
	<i>TAF/HAF</i>	0%	2%	10%	32%	55%	60%
	<i>Normalfahrer</i>	100%	97%	84%	56%	24%	15%
<b>Adoptionstheorie</b>							
Auswertung	$\Sigma$ MOP-automatisiert	0%	3%	16%	44%	76%	85%
	Zielwert	0%	3%	16%	50%	84%	90 - 100%
	Differenz	0%	0%	0%	6%	8%	-

Abbildung 37 visualisiert den Einfluss der Technologieadoption auf die mittlere Jahresfahrleistung der MOP-Flotte auf den Bundesautobahnen. Während in den ersten Phasen der Technologieeinführung zunächst in der Gruppe der Vielfahrer konventionelle Fahrzeuge von automatisierten Fahrzeugen ersetzt werden, findet in den späteren Phasen die Ersetzung von Fahrzeugen mit geringerer Jahresfahrleistung statt. Deshalb geht dann die mittlere Fahrleistung pro automatisiertem Fahrzeug zurück.

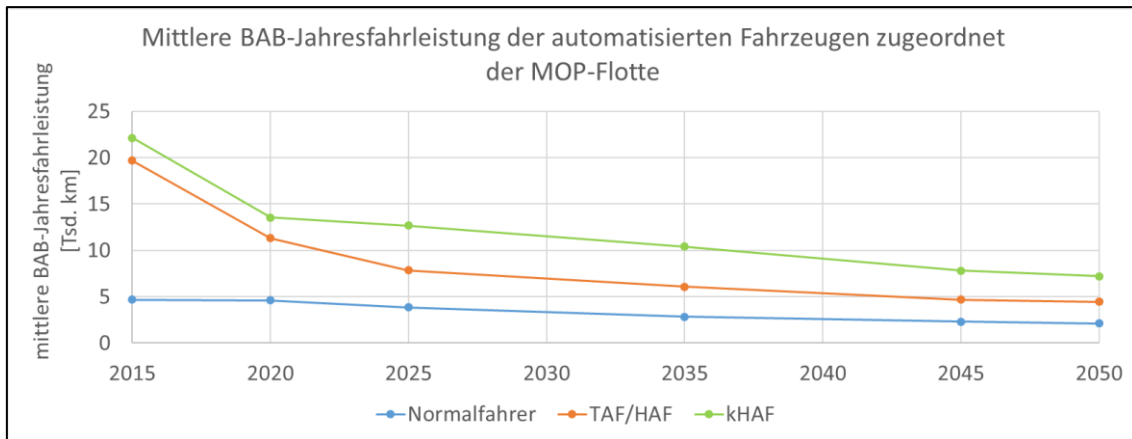


Abbildung 37 – BAB-Jahresfahrleistung der zugeordneten MOP-Flotte

### 3.4.3 Pkw-Nutzung auf dem Fernstraßennetz

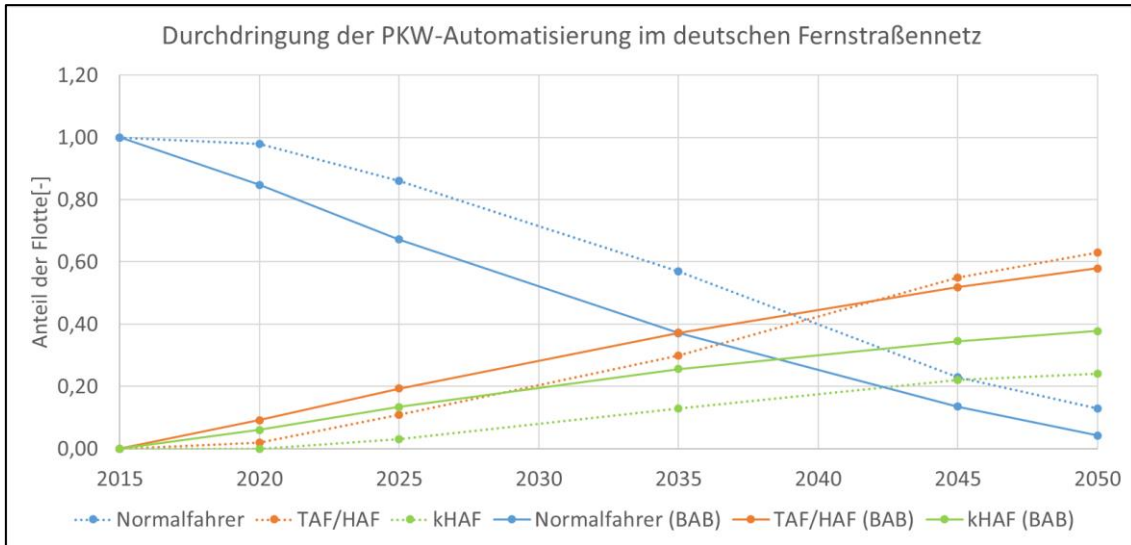
Um die Annahme der erhöhten Nutzung der automatisierten Fahrzeuge auf den Bundesautobahnen zu berücksichtigen, werden Zuschläge für die Pkw-Zusammensetzung berechnet. Die Zuschläge wurden aus dem Verhältnis zwischen der mittleren Jahresfahrleistung der jeweiligen MOP-automatisierten Stufe (Abbildung 37) und der mittleren Jahresfahrleistung der gesamten MOP-Flotte abgeleitet. So wird beispielsweise die Höhe des Zuschlags von kHAF für die BAB-Nutzung erst deutlich zunehmen (Vielfahrer dominieren die Zusammensetzung) und später nur begrenzt zunehmen (die Einführung der Technologie hat auch die Bevölkerungsgruppen mit einer geringeren Jahresfahrleistung erreicht).

Tabelle 17 – Zuschläge für die Zusammensetzung der automatisierten Flotte auf der BAB

Stufe	Netz	2015	2020	2025	2035	2045	2050					
kHAF	Deutschland	0,00	0,01	0,06	0,12	0,21	0,25					
	BAB	0,00	0%	0,01	0%	0,15	9%	0,26	14%	0,35	14%	0,37
TAF/HAF	Deutschland	0,00	0,02	0,10	0,32	0,55	0,60					
	BAB	0,02	2%	0,05	3%	0,17	7%	0,40	8%	0,54	-1%	0,56
Normalfahrer	Deutschland	1,00	0,97	0,84	0,56	0,24	0,15					
	BAB	0,98	-2%	0,94	-3%	0,68	-16%	0,34	-22%	0,11	-13%	0,07

Abbildung 38 zeigt die resultierende Durchdringung der teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen im deutschen Fernstraßennetz unter Berücksichtigung der pauschalen Zuschläge für die erhöhte Nutzung der Technologie im Bundesautobahnnetz.





**Abbildung 38** – Durchdringung der teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge im gesamten Netz (durchgezogene Linie) und Fernstraßennetz (gepunktete Linie)

## 4 Simulationsexperiment

### 4.1 Untersuchungsszenarien

Für die Simulationsstudie werden Szenarien festgelegt, mit deren Hilfe die Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität des gesamten deutschen Fernstraßennetzes hochgerechnet werden können. Hierfür werden zunächst, wie in Unterkapitel 2.1 beschrieben, die relevantesten Netzelemente im Detail untersucht. Die zu simulierenden Netzelemente bilden somit eine Basis für die Anzahl der Szenarien für die Simulationsstudie.

Für jedes der Netzelemente werden Simulationen mit jeder der unterschiedlichen teil- und hochautomatisierten Fahrfunktionen und den zu untersuchenden unterschiedlichen Nutzungsgraden durchgeführt. Des Weiteren werden mehrere Belastungsverhältnisse der Verkehrsstärke zwischen der Hauptfahrbahn und der Ein- bzw. Ausfahrt (sofern es eine dieser in dem untersuchten Netzelement geben sollte) betrachtet. Die Gesamtzahl der Simulationsszenarien ist also das Produkt der Anzahlen der einzelnen Elemente (Anzahl der Netzelemente x Anzahl der Fahrfunktionen x Anzahl der untersuchten Nutzungsgrade x Anzahl der Belastungsverhältnisse). Abbildung 39 zeigt die Bestandteile aus denen sich die Untersuchungsszenarien für die Simulationsstudie ergeben. Jede Kombination aus jeweils einem der vier Blöcke ergibt ein Szenario. Auf die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen wurde in Kapitel 2.1 eingegangen, die weiteren Elemente werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschreiben.

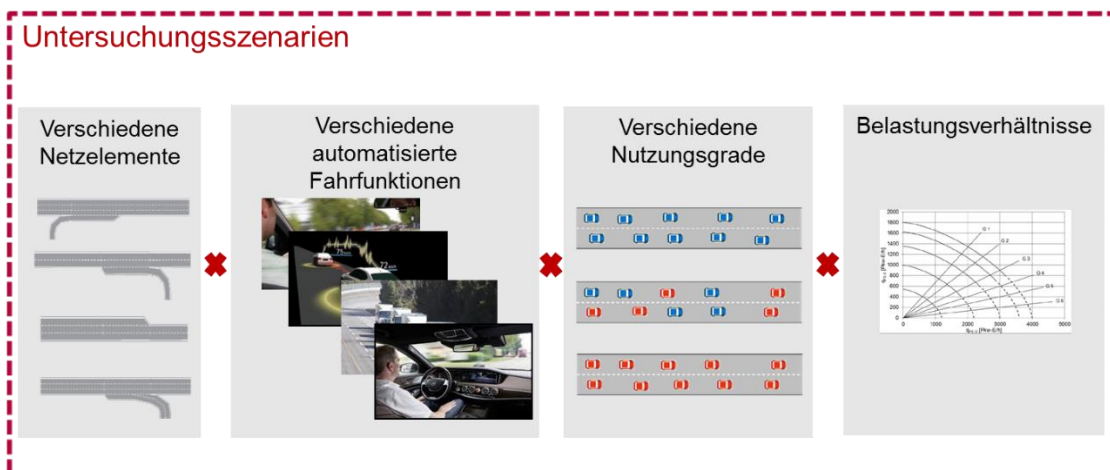


Abbildung 39 – Bestandteile aus denen sich die Untersuchungsszenarien der Simulationsstudie ergeben

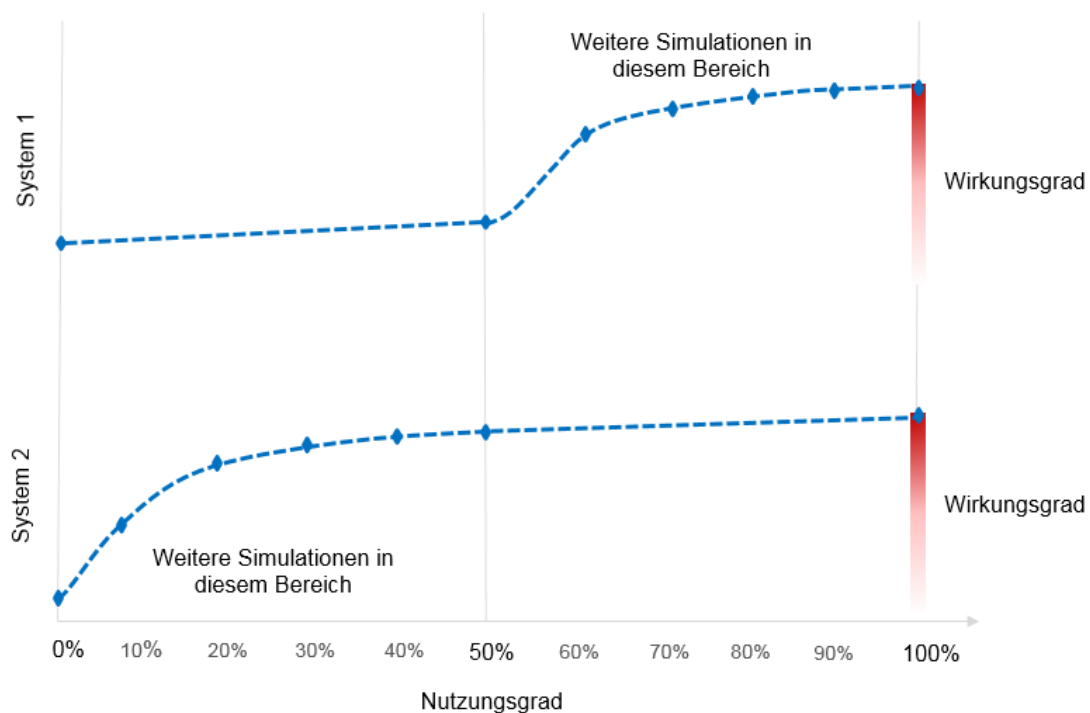
#### 4.1.1 Nutzungsgrade

Die zu simulierenden Nutzungsgrade werden innerhalb der Simulationsstudie so gewählt, dass sichergestellt ist, dass die Bereiche in denen sich die größte Wirkung bzw. die größten Wirkunterschiede der Systeme entfalten, detaillierter betrachtet werden. Es ist daher nicht sinnvoll, die

zu simulierenden Nutzungsgrade vorab für jedes Szenario festzulegen. In jedem Fall werden die folgenden Fälle simuliert:

- Nullfall (0% Nutzungsgrad als Basis für einen Vergleich)
- Mittlerer Nutzungsgrad (50% Nutzung der Systeme für eine grobe Abschätzung dafür, in welchem Bereich die größte Wirkung erzielt wird)
- Vollständige Automatisierung aller Fahrzeuge (100% Nutzungsgrad der Systeme)

Somit kann zunächst abgeschätzt werden, ob sich die größte Wirkung bei kleinen oder großen Nutzungsgraden entfaltet. Davon ausgehend werden dann weitere Nutzungsgrade in dem jeweils relevanten Bereich simuliert. Zwei Illustrationen hierfür sind in Abbildung 40 dargestellt. Im Beispiel von System 1 wird der größte Wirkungsgrad erst bei einem Nutzungsgrad oberhalb von 50% erreicht. Um herauszufinden, wo genau der größte Anstieg zu erwarten ist, werden weitere Simulationen im Bereich zwischen 50% und 100% Nutzungsgrad durchgeführt, während der untere Bereich vernachlässigt werden kann. Andersherum verhält es sich bei System 2, in dem der größte Wirkungsgrad bereits frühzeitig auf den Bereich zwischen 0% und 50% eingegrenzt werden kann.



**Abbildung 40** – Wirkungsgrade verschiedener Systeme und zugehörige simulierte Nutzungsgrade

Mit dieser Methode wird die Anzahl an Simulationsszenarien handhabbar gehalten, während es weiterhin möglich ist, die ausschlaggebenden Ergebnisse zu erfassen.

#### 4.1.2 Belastungsverhältnisse

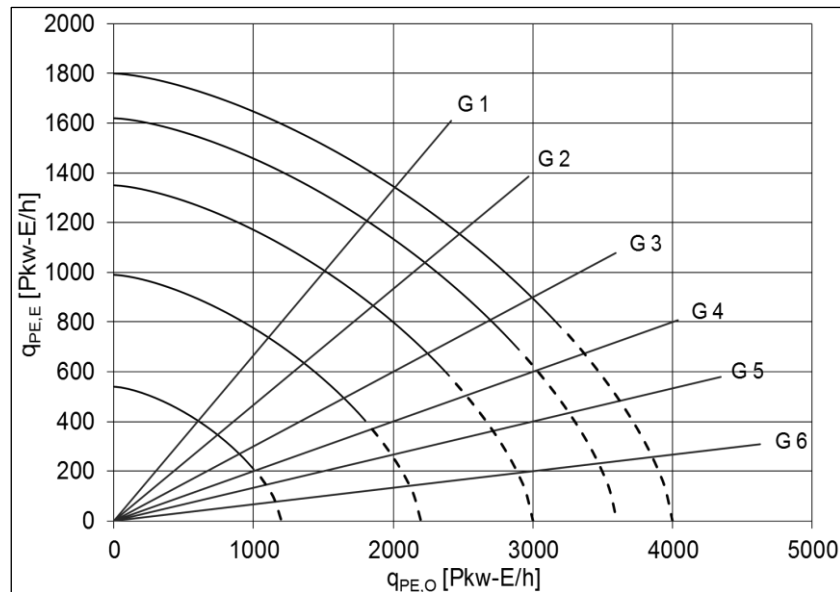
Die Verkehrsnachfrage wird in Kfz/h oder Pkw/h und Lkw/h für den Untersuchungszeitraum durch Quelle-Ziel-Matrizen vorgegeben. Die Verkehrsnachfrageganglinien sind die Eingangsdaten für die Fahrzeugerzeugung. Das gewählte Vorgehen basiert auf der Methodik, die für das Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [4] verwendet wurde. Da die Kapazität eines Knotenpunktes stark davon abhängt, wie das Verhältnis der Verkehrsstärke zwischen der Hauptfahrbahn und der Ein- bzw. Ausfahrt ist, werden unterschiedliche Verhältnisse betrachtet. Für jeden Teilknotenpunkttyp werden bis zu sechs solcher Belastungsverhältnisse untersucht, die auch in der Realität am häufigsten vorkommen. Zunächst wurden die Verhältnisse  $p_i$  des ein- bzw. ausfahrenden Verkehrs an der Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn festgelegt. Diese wurden gemäß der folgenden Formel umgerechnet in den Verhältniswert  $p_q$ , um die Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und des Ein-/ Ausfädelungstreifens zu berücksichtigen:

$$p_{q,i} = n_{E/A} \cdot \frac{n_{HFB}}{(n_{HFB} - 0,5)} \cdot p_i$$

mit:

- $p_q$  = Belastungsverhältnis  $q_{PE,E} / q_{PE,O}$  bzw.  $q_{PE,A} / q_{PE,U}$  in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt
- $i$  = Index für die Belastungsverhältnisse 1 bis 6 (Geraden in Abbildung 41)
- $n_{E/A}$  = Anzahl der Fahrstreifen in der Ausfahrt bzw. Einfahrt
- $n_{HFB}$  = Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn stromaufwärts von Einfahrten bzw. stromabwärts von Ausfahrten oder Verflechtungstrecken
- $p_i$  = Hilfsgröße:  $G_1$ : 100 %,  $G_2$ : 70 %,  $G_3$ : 45 %,  $G_4$ : 30 %,  $G_5$ : 20 %,  $G_6$ : 10 %

Die sechs Geraden, die sich aus den Belastungsverhältnissen ergeben, sind beispielhaft für das Netzelement E1-2 in Abbildung 41 dargestellt. Die Kapazität des Teilknotenpunktes für ein bestimmtes Belastungsverhältnis ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Kurve zwischen den Qualitätsstufen E und F (obere Kurve in Abbildung 41) des Bemessungsdiagramms nach HBS 2015.



**Abbildung 41** - Belastungsverhältnisse für das Simulationsexperiment einer Einfahrt E1-2 an zweistreifiger Hauptfahrbahn (aus [4])

## 4.2 Fahrzeugtypen innerhalb der Simulation

Um den Einfluss der vielen unterschiedlichen in der realen Welt existierenden Fahrzeugtypen auf die zu untersuchende Fragestellung zu berücksichtigen, werden auch verschiedene Fahrzeugtypen innerhalb der Simulation betrachtet und modelliert. Die unterschiedlichen Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten der einzelnen Fahrzeuge werden durch Verteilungsfunktionen abgebildet. Somit ist sichergestellt, dass einzelne Fahrzeuge beispielsweise in einer Notsituation mit unterschiedlicher maximaler Verzögerung abbremsen. Für die Lkw in der Simulation wird zwischen drei Typen unterschieden. Je nach Länge des Lkw ergibt sich ein veränderter Platzbedarf, was wiederum ein ausschlaggebender Aspekt für die Kapazität einer Straße ist. Hier wird deshalb in der Simulation von unterschiedlichen Typen von Lkw ausgegangen, die sich hinsichtlich ihrer Länge unterscheiden. Sie repräsentieren typische auf deutschen Straßen verkehrende Nutzfahrzeuge bestehend aus Gliederzügen mit und ohne Anhänger sowie Sattelzügen mit Längen zwischen 10,21 m und 16,88 m.

## 4.3 Verkehrsnachfrage

Die Simulationsstudie hat zum Ziel, die Kapazität einzelner Netzelemente unter unterschiedlichen Voraussetzungen zu ermitteln. Hierfür ist es notwendig, dass innerhalb der Simulationen der Verkehrsfluss auf den Netzelementen so erhöht wird, dass das Netz an seine Kapazitätsgrenze kommt. In der Simulation kann dies über die Verkehrsnachfrage gesteuert werden. Als Anhaltspunkt für die benötigte Verkehrsnachfrage zum Erreichen der Kapazitätsgrenze kann die Bemessungskapazität aus dem HBS verwendet werden. In einigen Fällen reicht diese Verkehrs-

nachfrage jedoch noch nicht aus, da ein verändertes Verhalten der simulierten Verkehrsteilnehmer eine erhöhte Kapazität zur Folge haben könnte. In diesen Fällen muss die Verkehrsnachfrage weiter erhöht werden. Die Verkehrsnachfrage darf allerdings nicht plötzlich steigen, sondern muss graduell gesteigert werden, um Verkehrszusammenbrüche aus anderen Gründen auszuschließen. Die verwendete Verkehrsnachfrageganglinie ist beispielhaft in Abbildung 42 dargestellt. Hierbei wird bei einer geringen Verkehrsstärke von 5% gemessen an der Kapazität laut HBS begonnen und in 10%- Schritten bis auf einen Auslastungsgrad von 60% gesteigert. Ab diesem Zeitpunkt werden die Steigerungen in 5%-Schritten vorgenommen. Die Steigerung erfolgt alle 5 Simulationsminuten. Die Simulationsdauer ist somit abhängig von der Anzahl der Steigerungen. Sollte die gewünschte Verkehrsnachfrage zu hoch sein, um im Netz untergebracht zu werden, hat dies keine Auswirkungen auf die Simulation, die zusätzlichen Fahrzeuge werden lediglich nicht in das Netz einfahren können.

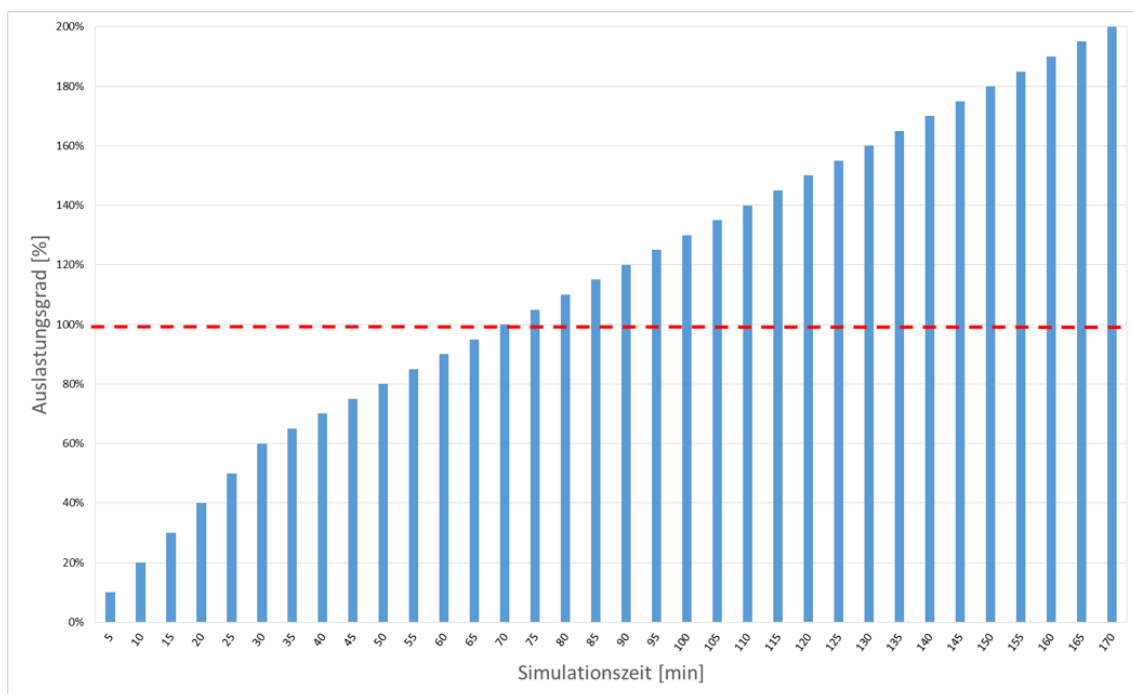


Abbildung 42 - Verkehrsnachfrageganglinie innerhalb der Simulation (rote Linie= Kapazität laut HBS)

#### 4.4 Anzahl der Simulationsdurchläufe

Bei Simulationsprogrammen, die mit Zufallszahlen arbeiten, sollen mehrere Simulationsläufe mit verschiedenen Startwerten der Zufallsgeneratoren durchgeführt werden, deren Ergebnisse dann gemittelt werden. Die Festlegung der Anzahl notwendiger Simulationsläufe muss auf der Basis statistischer Auswertungen geschehen, auch ist die Signifikanz der Unterschiede bei Simulationsergebnissen statistisch abzusichern und zu bewerten. Die Ermittlung der Anzahl der Simulationsläufe basiert auf [26] beginnt dabei mit der Schätzung der Standardabweichung:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

mit:

$s$  = Standardabweichung

$x_i$  = Variable, für die die Standardabweichung zu schätzen ist

$\bar{x}$  = Mittelwert

$n$  = Anzahl der Simulationsläufe

Daraufhin müssen das Konfidenzniveau  $\alpha$  und das Konfidenzintervall  $C$  festgelegt werden, um die notwendige Anzahl der Simulationsläufe zu berechnen:

$$n \geq \frac{t(\alpha, n-1)^2 \cdot s^2}{C^2}$$

mit:

$n$  = Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe

$t(\alpha, n-1)$  = Wert aus der Student-Verteilung für einen einseitigen Fehler

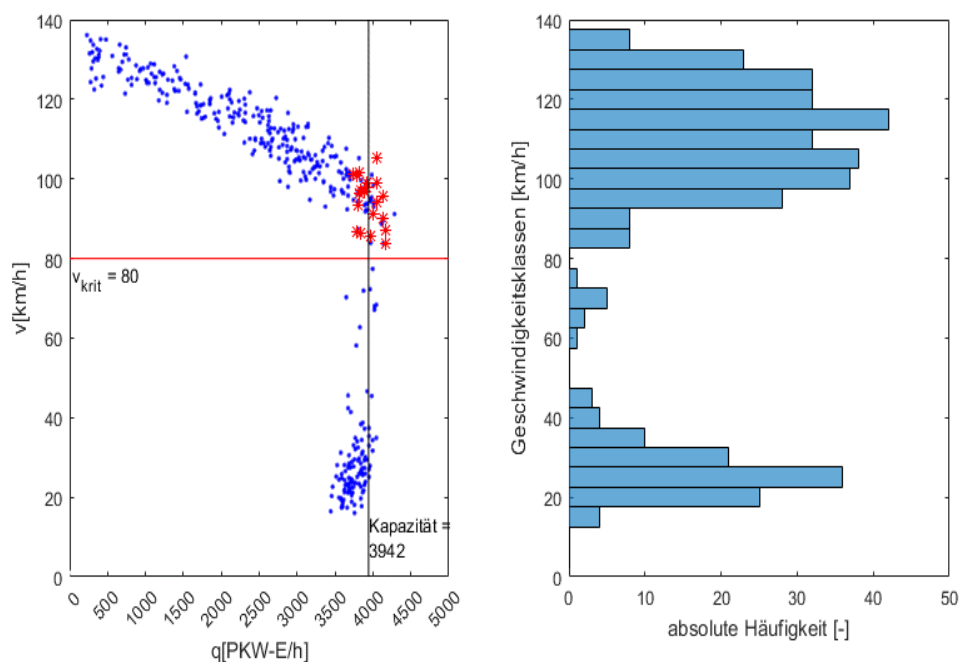
$s$  = Standardabweichung der untersuchten Kenngröße

$C$  = gewünschtes Konfidenzintervall

Basierend auf der Berechnung für das Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [4], werden für die Simulationen innerhalb dieses Projektes jeweils 20 Simulationsläufe durchgeführt.

## 5 Vorgehen bei der Ermittlung der Kapazitäten

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Ermittlung der Kapazitäten detailliert beschrieben. Zur Ermittlung der Kapazität an Teilknotenpunkten wird die Methodik aus dem Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [4] verwendet. Hierbei wird für jedes Untersuchungsszenario aus dem Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm (Abbildung 43, linke Grafik), welches 5-minütig aufgezeichnete Querschnittsmesswerte der Simulation enthält, ermittelt, wo sich die sog. kritische Geschwindigkeit (Abbildung 43, rote Linie) befindet. Diese ist im zugehörigen Histogramm (Abbildung 43, rechte Grafik) die Stelle, an der die geringste Dichte an Geschwindigkeitswerten im Bereich von 60 bis 80 km/h vorhanden ist. Als relevante Verkehrsstärkewerte werden die Werte, die oberhalb dieser Geschwindigkeit liegen und einen Verkehrszusammenbruch hervorrufen, ausgemacht (Abbildung 43, linke Grafik, rot markierte Punkte). Das bedeutet, dass das Wertepaar im folgenden Intervall die kritische Geschwindigkeit unterschreiten muss und die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Intervallen 15km/h nicht unterschreiten darf. Das Mittel der Verkehrsstärkewerte der gefundenen Einbruchswertepaare bildet den Wert für die Kapazität (Abbildung 43, linke Grafik, schwarz markierte Linie mit zugehörigem Wert).

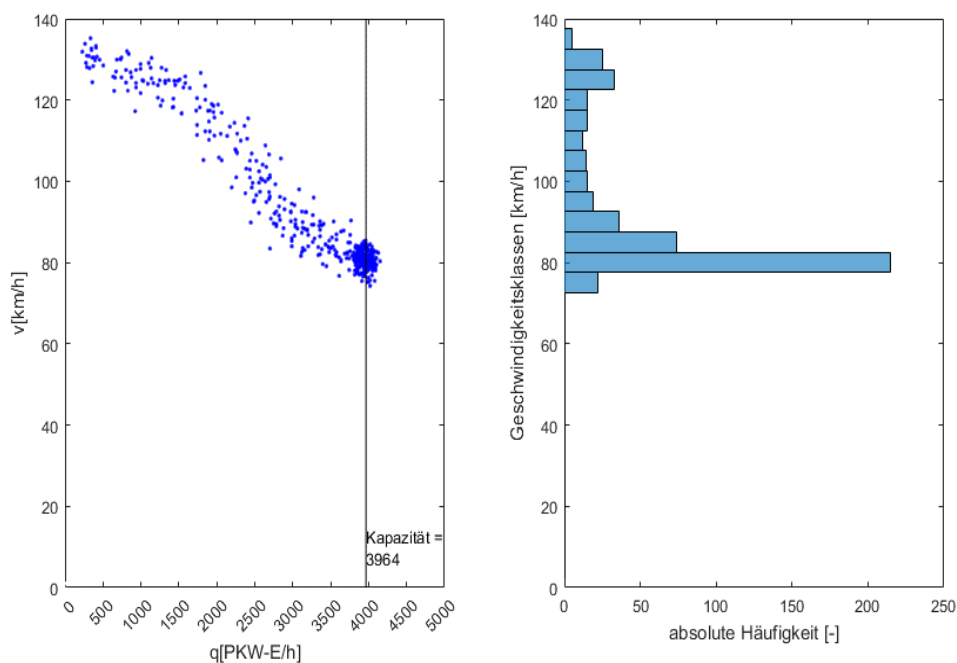


**Abbildung 43** – Bestimmung der Kapazität anhand des Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramms

Die Bestimmung der Kapazität anhand der Verkehrszusammenbrüche ist jedoch nicht immer möglich. Insbesondere mit bestimmten Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer entstehen keine Zusammenbrüche (Abbildung 44, linke Grafik). Für diese Fälle wird eine veränderte Me-



thodik für die Berechnung des Kapazitätswertes erforderlich. In Anlehnung an die oben beschriebene Berechnung sollte der Kapazitätswert nicht das Maximum der gemessenen Verkehrsstärkewerte darstellen, sondern etwas darunter liegen. Es wurde dafür das 90. Perzentil der Verkehrsstärkewerte verwendet. Um sicher zu stellen, dass die Simulationsdauer keinen Einfluss auf diesen Wert hat, wurde für jeden Simulationslauf ein Abbruchkriterium bestimmt. Dieses gilt als erfüllt, sobald sich der Maximalwert der gemessenen Verkehrsstärke über die Dauer von 3 Intervallen nicht mehr erhöht. Es wird dann das Intervall gesucht, zu dem der Wert des 90. Perzentils am nächsten ist. In diesem Intervall ergeben die Verkehrsstärke des aus- bzw. einfahrenden Stroms und des Stroms der Hauptfahrbahn ein Wertepaar für die Kapazität. Der Mittelwert aller summierten Wertepaare ergibt die Kapazität für das Netzelement (Abbildung 44, linke Grafik, schwarz markierte Linie mit zugehörigem Wert).



**Abbildung 44** – alternative Bestimmung der Kapazität

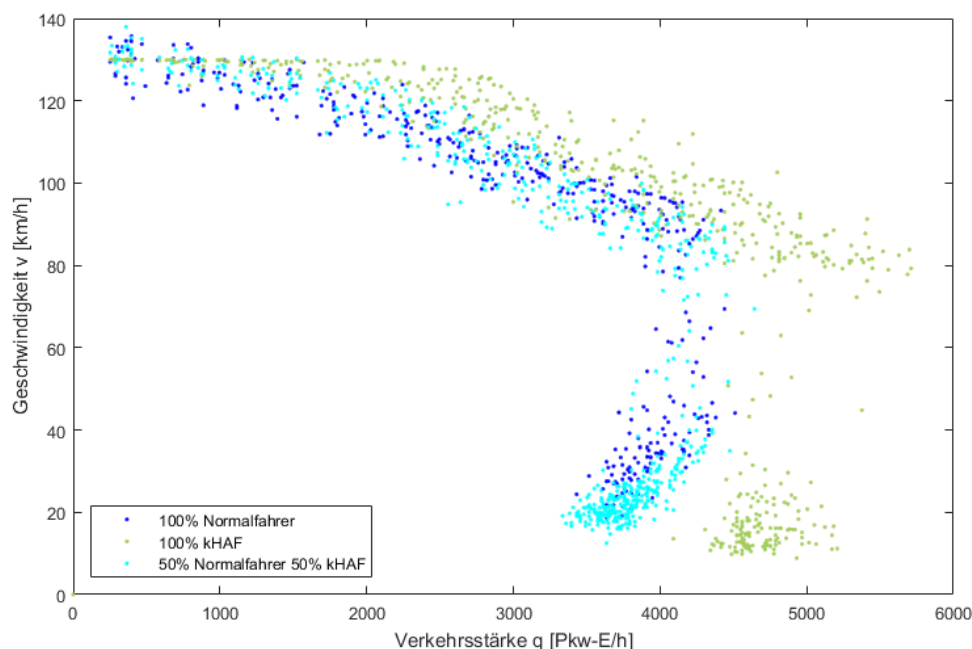
## 6 Ergebnisse aus der Simulation

Innerhalb dieses Kapitels werden die Ergebnisse aus den Verkehrssimulationen für die einzelnen Netzelemente dargestellt. Es werden die unterschiedlichen Untersuchungsszenarien, wie sie in Kapitel 4.1 genannt sind, einzeln betrachtet.

### 6.1 Einfahrten

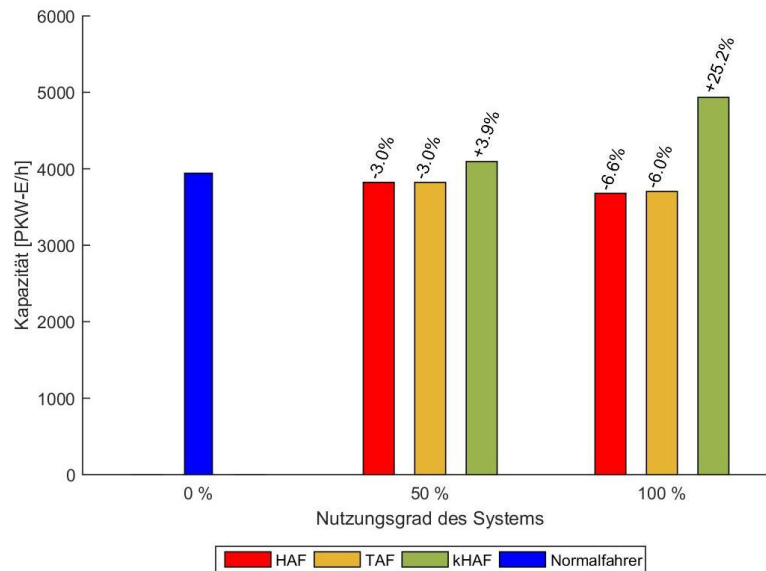
In Einfahrten ergeben sich klassische Engpasssituationen bei denen häufig Verkehrszusammenbrüche zu beobachten sind. Bei solchen Netzelementen ist es daher von besonderer Bedeutung, unterschiedliche Belastungsverhältnisse zu betrachten, da die Menge des Verkehrs des einfahrenden Stroms einen erheblichen Einfluss auf die Kapazität haben kann. Auf das Netzelement E1-2 (einstreifige Einfahrt an zweistreifiger Hauptfahrbahn) wird genauer eingegangen, die Ergebnisse aller Untersuchungsszenarien sind im Anhang zu finden.

Aus den Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagrammen (Abbildung 45) lässt sich bereits erkennen, dass die Kapazität des Szenarios 100% kHAF im Vergleich zu dem Basisszenario steigt. Auch die Geschwindigkeitsgrenze bei 130 km/h ist deutlich in dem Diagramm sichtbar. Das Szenario mit jeweils 50% der beiden Fahrermodelle liegt jedoch nicht in der Mitte, sondern ist sehr ähnlich zum Basisszenario. Daraus lässt sich schließen, dass erst mit einem Nutzungsgrad von mehr als 50% kHAF die Kapazität merklich steigt.



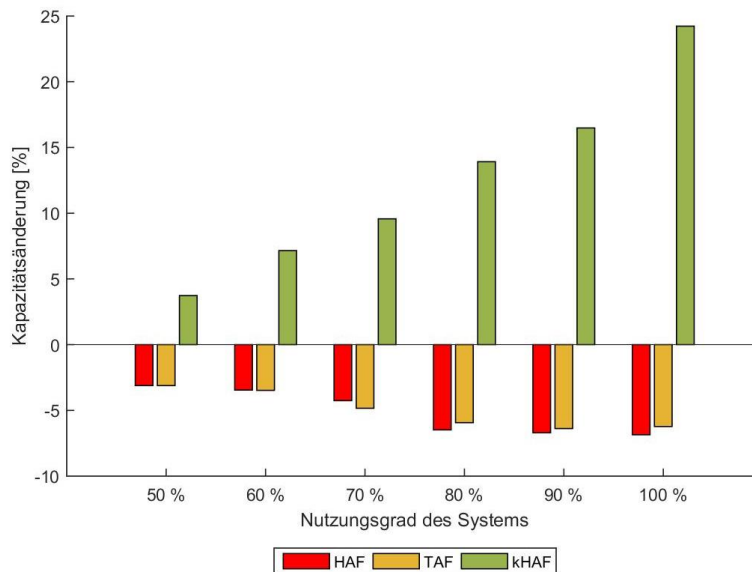
**Abbildung 45** – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramme für unterschiedliche Szenarien jeweils auf dem Netzelement E1-2 mit dem Belastungsverhältnis 5

Die Kapazitätsänderungen relativ zum Basisszenario sind in Abbildung 46 zu finden. Abgesehen von den oben genannten Entwicklungen in den Szenarien mit kHAF ist zu erkennen, dass die Kapazität mit steigendem Nutzungsgrad von HAF und TAF sinkt.



**Abbildung 46** – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 4 relativ zum Basisszenario „100% Normalfahrer“

Angesichts der Entwicklung in Abbildung 46 stellt sich die Frage, wie die Kapazitätsänderungen zwischen 50% und 100% Nutzungsgrad verlaufen. Insbesondere ist es von Interesse, ob sich die positiven Nutzen bei den Szenarien mit kHAF erst bei einer sehr großen Ausstattungsrate ergeben. Wie in Abbildung 47 zu erkennen, ist der Kapazitätssprung zwischen einem Nutzungsgrad von 90% kHAF zu 100% kHAF zwar größer als in den vorherigen Schritten, jedoch sind kontinuierliche Steigerungen schon ab 50% erkennbar. Bei einem Nutzungsgrad von 100% kHAF wurde in diesem Szenario eine Kapazitätssteigerung von 25% gegenüber dem Basisszenario mit 100% Normalfahrern erreicht.

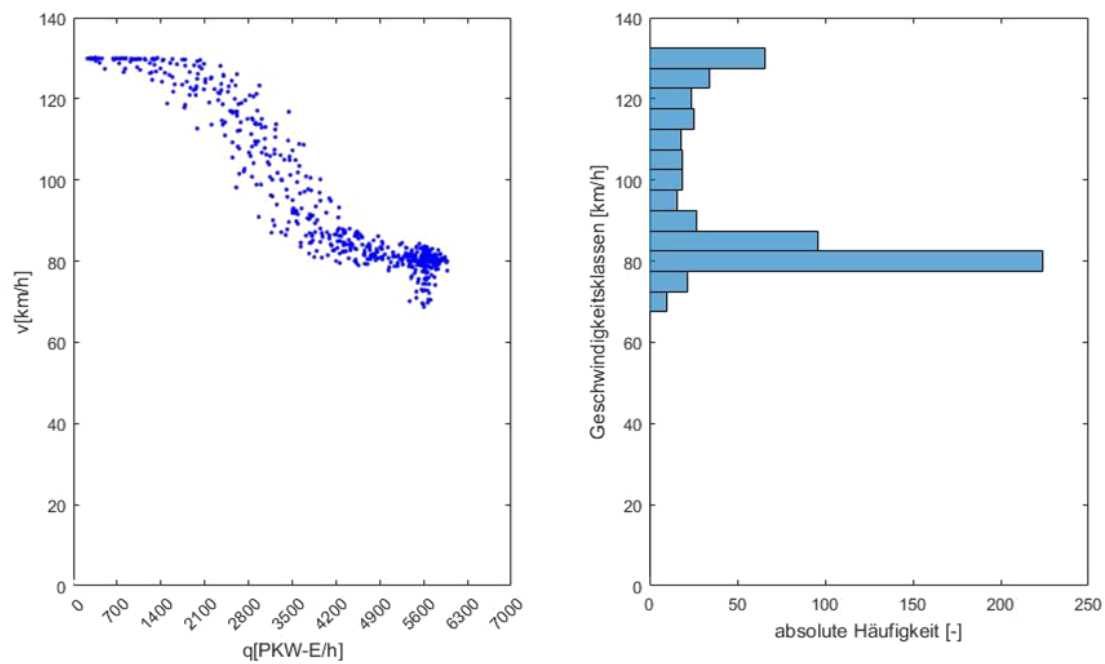


**Abbildung 47** – Entwicklung der Kapazitätswerte für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 4 relativ zum Basiszenario ab einem Nutzungsgrad von 50%

In anderen Einfahrten verhält sich dies ähnlich. Es lässt sich schlussfolgern, dass sich die Kapazität von Einfahrten mit höheren Nutzungsgraden von teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen (mit den Eigenschaften, wie sie in Kapitel 2.1.3 beschrieben sind) zwar in geringem Maß reduziert. Dies ist hauptsächlich durch die deutlich höheren Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen bedingt. Die kommunizierenden hochautomatisierten Fahrzeuge ermöglichen geringere Sicherheitsabstände und steigern damit die Kapazität bis zu rd. 25%. Die größten Steigerungen der Kapazität treten allerdings erst bei einem Nutzungsgrad von mehr als 50% auf. Im Bereich von 50 bis 100% Nutzungsgrad der kHAF sind die Steigerungen kontinuierlich.

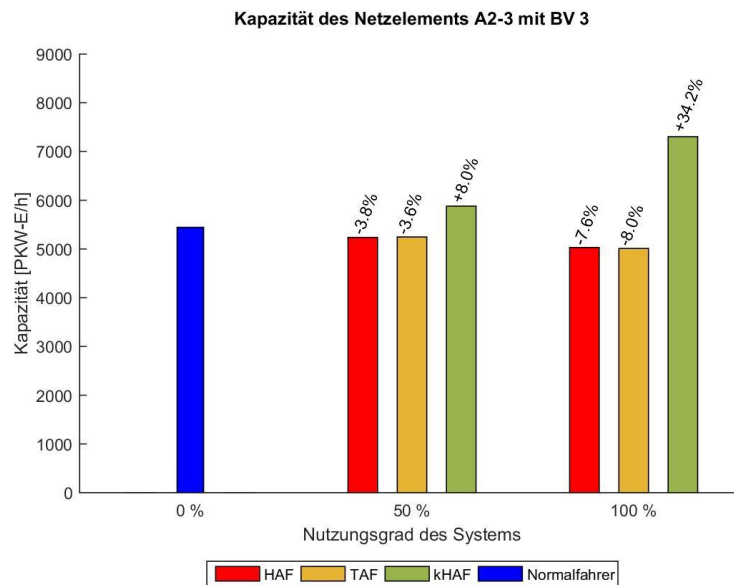
## 6.2 Ausfahrten

Die Untersuchung von Ausfahrten zeigt zunächst, dass die Kapazität nicht mehr nach dem Vorgehen mit Berücksichtigung von Verkehrszusammenbrüchen berechnet werden kann, da in einigen Konstellationen (vor allem bei hohen Nutzungsgraden von TAF und HAF, wenn nur wenige Fahrzeuge ausfahren) keine Verkehrszusammenbrüche mehr festzustellen sind. Wie in Abbildung 48 zu sehen, pendelt sich die Geschwindigkeit der Fahrzeuge an der Kapazitätsgrenze auf die der langsamsten Verkehrsteilnehmer im Netz (Lkw mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h) ein und ab einem gewissen Zeitpunkt erhöht sich die Verkehrsstärke nicht weiter.



**Abbildung 48** – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm mit zugehörigem Histogramm der Geschwindigkeiten für das Netzelement zweistreifiger Streckenabschnitt mit 100% kHAF

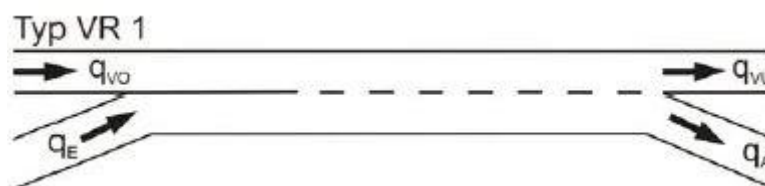
Die vermiedenen Zusammenbrüche lassen sich mit den großen Abständen der Fahrzeuge zueinander erklären. Durch Fahrstreifenwechsel werden keine starken Verzögerungen der auf dem Zielfahrstreifen fahrenden Folgefahrzeuge erzwungen, was bei dichtem Verkehr einen Stau auslösen kann. Es entstehen hier keine Staus. Die Auswirkungen auf die Kapazität sind bei TAF und HAF allerdings auch hier im Vergleich zum Basisszenario negativ. Abbildung 49 stellt den Verlauf der Kapazitätsänderungen für die drei Systeme im Vergleich zum Basisszenario dar. Es ist erkennbar, dass bei dem Szenario mit 100% kHAF sehr hohe Kapazitätssteigerungen von bis zu fast 35% erreicht werden konnten.



**Abbildung 49** - Kapazitäten und Kapazitätsänderungen für das Netzelement A2-3 Belastungsverhältnis 3 relativ zum Basisszenario „100% Normalfahrer“

### 6.3 Verflechtungen

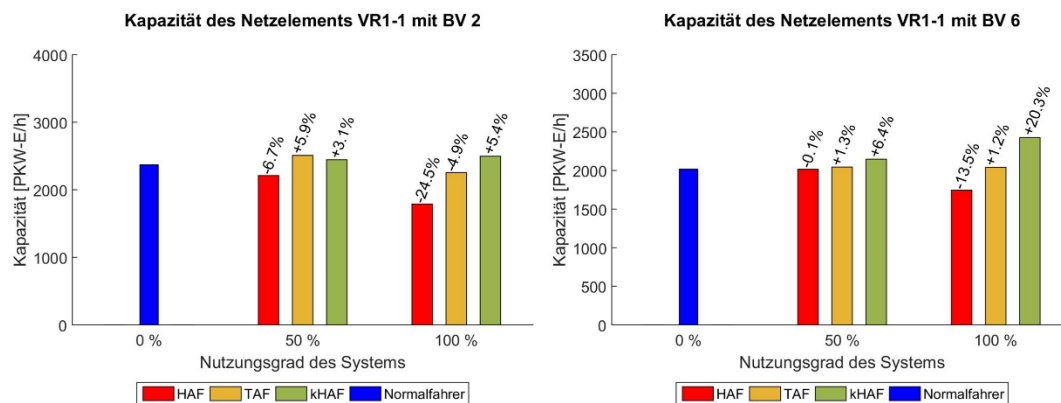
In Verflechtungsbereichen ist insbesondere das Fahrstreifenwechselverhalten der Verkehrsteilnehmer ausschlaggebend für die Kapazität des Netzabschnittes. Innerhalb dieser Studie wurde ein sogenanntes VR-Netzelement betrachtet. Hierbei gibt es eine Verflechtungsstrecke an einer Verteilerfahrbahn, jedoch keine Hauptfahrbahn. Das in Abbildung 50 dargestellte Netzelement ist ein typisches Element eines Autobahnkreuzes. Das bedeutet, dass alle Fahrzeuge des Stroms  $q_{VO}$  nach Passieren der Verflechtung Teil des Stroms  $q_A$  werden (ausfahren). Alle Fahrzeuge des einfahrenden Stroms  $q_E$  müssen im Verflechtungsbereich einen Fahrstreifenwechsel nach links durchführen und werden dann zum Strom  $q_{VU}$ .



**Abbildung 50** – Netzelement Verflechtung des Typs VR1 nach RAA [7]

In diesem Netzelement ist zu beobachten, dass die teilautomatisierten Fahrzeuge weniger Schwierigkeiten haben die Fahrstreifenwechsel durchzuführen als die hochautomatisierten Fahrzeuge. Das ist durch die Wahl der Verhaltensparameter zur begründen, in denen die TAF bei einem Fahrstreifenwechsel (analog zu den Normalfahrern) kleinere Lücken wählen als HAF.

Gleichzeitig sind die Abstände zwischen einander folgenden TAF genauso groß wie zwischen einander folgenden HAF. Das Finden einer ausreichend großen Lücke ist demzufolge für TAF einfacher als für HAF. In den Ergebnissen spiegelt sich das in der Kapazität wider. In Abbildung 51 sind die Kapazitätsänderungen für zwei verschiedene Belastungsverhältnisse dargestellt. Deutlich erkennbar ist hier, dass die Kapazität der TAF bei vollem Nutzungsgrad, im Gegensatz zu den Ergebnissen der Ein- und Ausfahrten, höher liegt als die der HAF. Je nach Belastungsverhältnis ist dies auch schon bei geringeren Nutzungsgraden zu beobachten.



**Abbildung 51** – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen des Netzelements VR1-1 für die Belastungsverhältnisse 2 und 6 relativ zum Basisszenario

#### 6.4 Streckenabschnitte

Für die Kapazitätsbetrachtung von Strecken, wurden Streckenabschnitte mit einer Einfahrt simuliert, um innerhalb der Streckenabschnitte Verkehrszusammenbrüche erzeugen zu können. Dafür werden Einfahrten mit einer geringen Verkehrsstärke vom einfahrenden Strom verwendet, die dann Verkehrszusammenbrüche auf der Hauptfahrbahn bedingen. Bei solchen Belastungsverhältnissen ist die Kapazität maßgeblich von der stromaufwärts liegenden Strecke beeinflusst. Es werden Netzelemente und zwei- und dreistreifigen Strecken verwendet und die Messquerschnitte entsprechend auf dem Streckenabschnitt gewählt.

In Abbildung 52 ist die Entwicklung der Kapazitätswerte der beiden betrachteten Streckenabschnitte (zwei- und dreistreifige Strecke) dargestellt. Erneut ergibt sich in diesen Szenarien durch die teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge eine Kapazitätsminderung, während die kHAF, insbesondere ab einem Nutzungsgrad von über 50%, kapazitätssteigernd wirken und die Kapazität um bis zu knapp 30% oder 35% erhöhen.

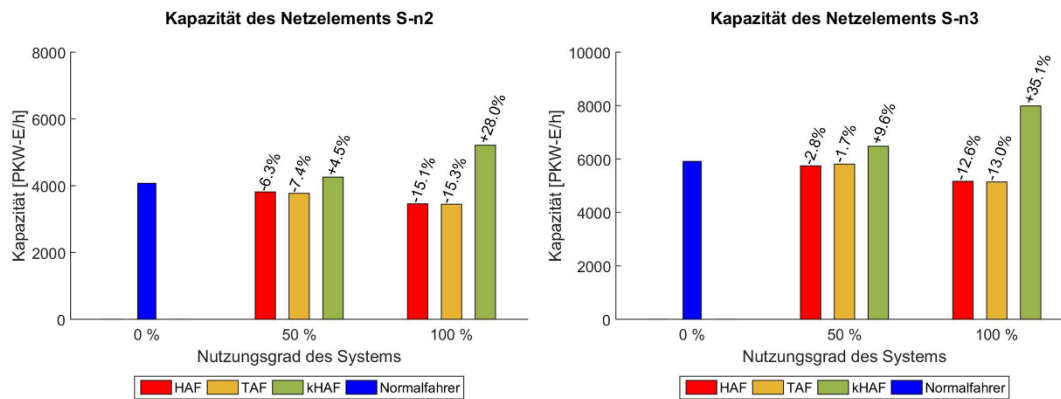


Abbildung 52 – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen auf zwei- bzw. dreistreifigen Streckenabschnitten

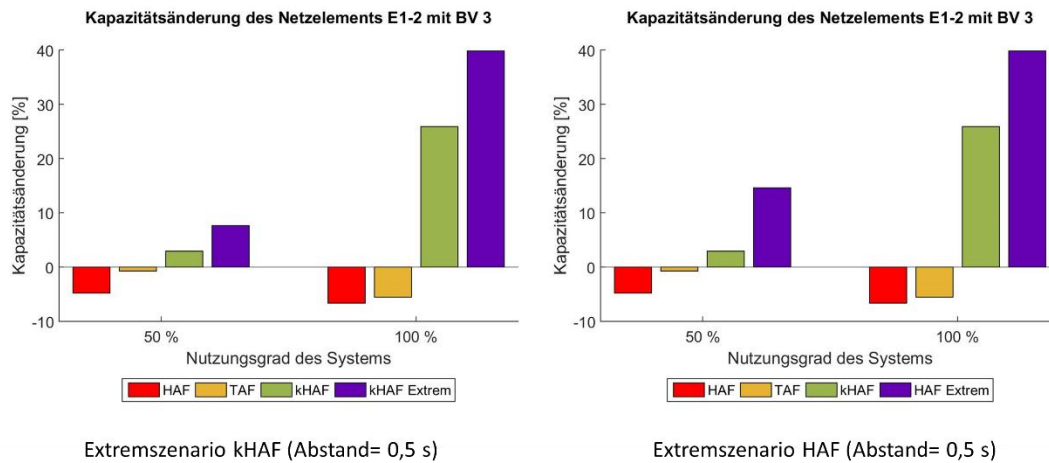
## 6.5 Weitere Ergebnisse

### 6.5.1 Extremszenarien

Um herauszufinden, ob noch weitere Kapazitätssteigerungen durch automatisierte Fahrzeuge zu erwarten sind, werden weitere Szenarien mit geringeren Folgeabständen simuliert. Die Abstände werden hierbei auf einen Wert von 0,5 Sekunden herabgesetzt.

Für das Netzelement E1-2 wurden weitere Simulationen durchgeführt, in denen die Verhaltensparameter der hochautomatisierten Fahrzeuge auf die Extremwerte verändert wurden. Dies wurde in zwei Varianten durchgeführt, im ersten Fall erhielten die kHAF die besonders kleinen Folgeabstände, im zweiten Fall die HAF. Die Ergebnisse sind in den beiden Grafiken in Abbildung 53 dargestellt. In der linken Grafik, in der die kHAF die extrem kleinen Abstände zu den Vorderfahrzeugen hielten, ist zu erkennen, dass weiterhin die größten Kapazitätssteigerungen erst bei einem Nutzungsgrad oberhalb von 50% erreicht werden können. Dies ist durch die Eigenschaft der kHAF zu begründen, dass sie nur dann einen solch geringen Abstand zum Vorderfahrzeug einnehmen können, sofern dieses auch ein kHAF ist. Bei einem Nutzungsgrad von weniger als 50% folgen die kHAF noch häufig einem Normalfahrer und können somit nicht das volle Potenzial ausschöpfen. In der rechten Grafik ist der Fall „HAF\_Extrem“ dargestellt. Das bedeutet, dass alle HAF die extrem geringen Abstände zu ihren jeweiligen Vorderfahrzeugen halten können. Da es bei den HAF nicht darauf ankommt, welche Art Fahrer bzw. System das Vorderfahrzeug steuert, können diese immer einen geringen Abstand einregeln. Dies spiegelt sich positiv in den Ergebnissen wider. In der rechten Grafik von Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die Kapazität fast linear steigt und schon bei einem Nutzungsgrad des Systems von 50% eine beachtliche Kapazitätssteigerung zu erkennen ist. Bei 100% Nutzungsgrad eines so ausgelegten Systems kann sich die Kapazität dieses Netzelementes im Vergleich zu einem Szenario mit ausschließlich Normalfahrern um 40% steigern.





**Abbildung 53** – Kapazitätsänderung für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 3 für unterschiedliche Systeme incl. Extremszenarien

Um herauszufinden, wo die Grenzen der Auswirkungen liegen, werden die unterschiedlichen Untersuchungsszenarien mit 100 % “HAF Extrem“, in denen die HAF besonders kleine Folgeabstände erhielten, simuliert. Die Ergebnisse aus den Verkehrssimulationen für die einzelnen Netzelemente befinden sich im Anhang II.

### 6.5.2 Mischszenarien

Basierend auf den Ergebnissen zur Modellierung der Fahrzeugflotte, wurden weitere Mischszenarien für die Jahre 2030, 2040 und 2050 simuliert. Tabelle 16 und Tabelle 17 stellen die verwendeten Ausstattungsgrade der Systeme für Pkw und Lkw dar.

**Tabelle 18** – Geschätzter Ausstattungsgrad der Systeme in der deutschen PKW-Flotte

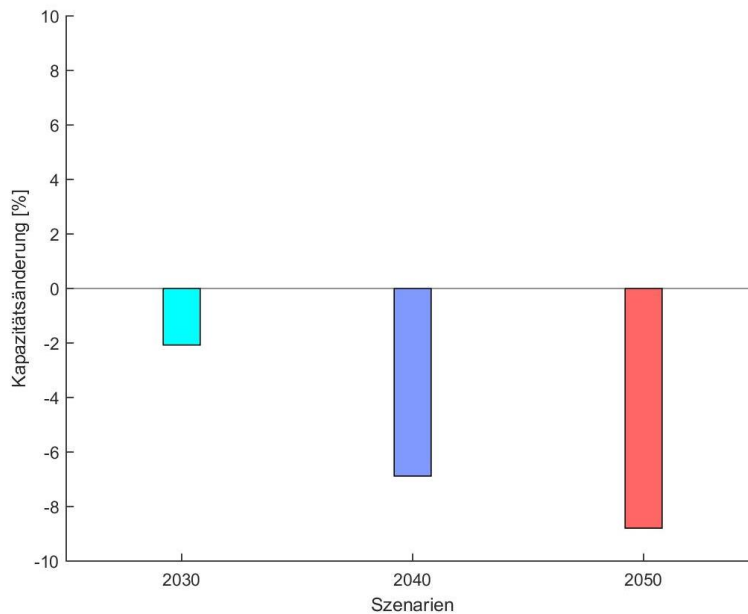
	2030	2040	2050
Normalfahrer	76%	34%	13%
TAF	10%	27%	36%
HAF	8%	21%	27%
kHAF	6%	18%	24%

**Tabelle 19** – Geschätzte Ausstattungsgrad von Systeme in der deutschen LKW-Flotte

	2030	2040	2050
Normalfahrer	55%	17%	2%
TAF	21%	40%	29%
HAF	17%	29%	25%
kHAF	7%	14%	44%

Die Kapazitätsänderungen relativ zum Basisszenario sind in Abbildung 54 zu finden. Die Ausstattungsgrade von TAF und HAF erhöhen sich in den Jahren und führen dazu, dass die Kapazität mit

steigendem Ausstattungsgrad von HAF und TAF sinkt. Andererseits ist, wie vorher gesehen, ein Anstieg der Kapazität durch KHAF (durch die geringeren Abstände zwischen den Fahrzeugen) meist erst bei einem Ausstattungsgrad von über 50% vorhanden. Die Kapazität reduziert sich unter den Annahmen für das Szenario 2050 um rund 9 % verglichen mit dem Basisszenario.

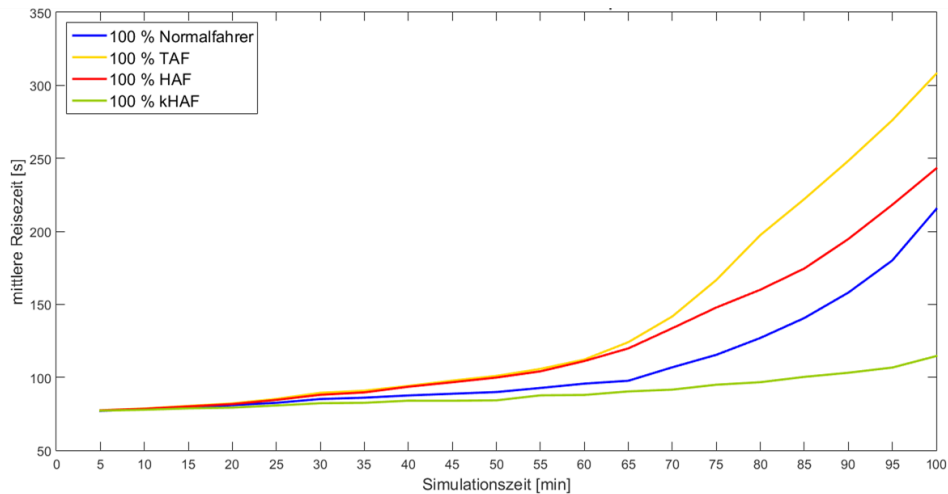


**Abbildung 54** – Kapazitätsänderung für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 2 für die Zukunftsszenarien

Weitere Ergebnisse sind im Anhang II zu finden.

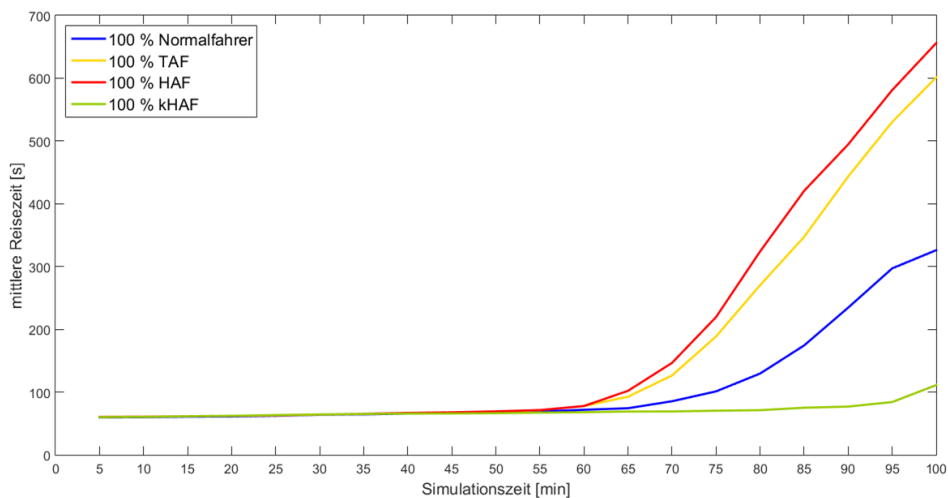
### 6.5.3 Fahrzeiten

Abgesehen von den Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten können aus den Messquerschnitten auf den Netzelementen auch Fahrzeiten ermittelt werden. Hierbei wird die Zeit gemessen, die es dauert bis ein Fahrzeug das komplette Netzelement in dem Simulationsszenario mit steigender Verkehrsnachfrage durchfährt. Auch diese Fahrzeiten werden jeweils für 5 Minuten-Intervalle aggregiert und für unterschiedliche Routen (z.B. Durchfahren der Hauptfahrbahn und von der Einfahrt kommend) getrennt betrachtet. Ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung der Kapazitäten ist auch in diesen Ergebnissen zu erkennen. In Abbildung 55 sind die Fahrzeiten für das Netzelement E1-2 für die Fahrzeuge, die nur die Hauptfahrbahn durchfahren; in Abbildung 56 für die von der Einfahrt kommenden Fahrzeuge dargestellt.



**Abbildung 55** – Mittlere Fahrzeit auf der Hauptfahrbahn des Netzelements E1-2 für unterschiedliche Szenarien

Im Szenario mit 100% kHAF treten erst Verlustzeiten gegenüber freier Durchfahrt auf als im Szenario mit 100% Normalfahrern. Bei TAF und HAF treten im Vergleich zu dem Basiszenario (100% Normalfahrer) schon sehr früh höhere Verlustzeiten auf.



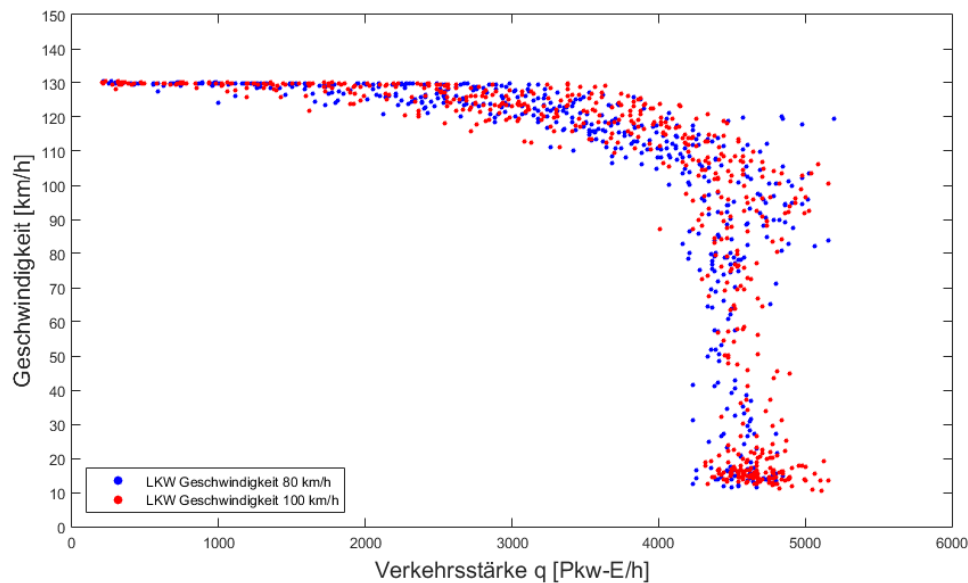
**Abbildung 56** – Mittlere Fahrzeit auf der Einfahrt des Netzelements E1-2 für unterschiedliche Szenarien

Für die Einfahrt ist dies noch deutlicher zu erkennen. Auf Grund der erschwerten Fahrstreifenwechsel für die HAF und TAF ist hier ein noch größerer Unterschied zu den Normalfahrern vorhanden.

#### 6.5.4 Veränderte Lkw-Geschwindigkeitsbeschränkungen

Mit zunehmender Automatisierung im Verkehr ist es vorstellbar, dass auch die Regelungen zur Höchstgeschwindigkeit für Lkw gelockert werden könnten. Um die Effekte, die eine veränderte

Lkw-Geschwindigkeitsbeschränkung auf die Kapazität haben könnte, herauszufinden, wurde dies beispielhaft für das Netzelement E1-2 in der Simulation realisiert. Automatisierte Lkw haben hier eine Geschwindigkeitsbeschränkung (und gleichzeitig auch Wunschgeschwindigkeit) von 100 km/h. Aus dem Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm in Abbildung 57 lässt sich erkennen, dass diese Änderung hinsichtlich der Kapazität vom Netzelement E1-2 kaum Änderungen hervorbringt.



**Abbildung 57** – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm des Netzelements E1-2 mit dem Belastungsverhältnis 2 mit 100% kHAF für den Fall a) Geschwindigkeitsbeschränkung der Lkw = 80km/h und b) Geschwindigkeitsbeschränkung der Lkw = 100km/h

## 6.6 Fazit

Aus den Ergebnissen der Simulationsstudie lässt sich schlussfolgern, dass die Kapazität der Infrastruktur maßgeblich mit dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer zusammenhängt. Durch ein verändertes Verhalten ergeben sich auch geänderte Kapazitäten für die Infrastruktur. Die einzelnen Netzelemente unterscheiden sich jedoch hinsichtlich des Änderungsgrades der Kapazität. Bei Ein- und Ausfahrten lassen sich unter den getroffenen Verhaltensannahmen deutliche Kapazitätssteigerungen durch kommunizierende hochautomatisierte Fahrzeuge im Vergleich zu den Normalfahrern erreichen, wohingegen die konservativ ausgelegten teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge, die große Fahrzeugfolgeabstände einhalten, Kapazitätsminderungen mit sich ziehen. In Verflechtungsbereichen hängt die Kapazität stark vom Fahrstreifenwechselverhalten der Verkehrsteilnehmer ab. Bei solchen Systemen, die auf große Freiräume auf dem Zielfahrstreifen angewiesen sind, vermindert sich die Kapazität bei hohen Nutzungsgraden des Systems.

Je nach Ausprägung des Systems ergeben sich also unterschiedliche Wirkungen hinsichtlich der Kapazität. Durch die hochautomatisierten Fahrzeuge ist ein großes Potenzial zur Kapazitätssteigerung erkennbar, allerdings hängt dies maßgeblich von der erlaubten Systemausprägung ab. Die ‚konservativ‘ gestalteten hochautomatisierten Fahrzeuge, mit Mindestzeitlücken von 1,8 Sekunden, wirken negativ auf die im Vergleich zum Normalfahrer erreichten Kapazitäten. Das Abstandsverhalten der Fahrzeuge hat den größten Einfluss auf die Kapazität, mit kleineren Folgeabständen lassen sich höhere Kapazitäten erreichen. Allerdings werden in Mischszenarien, in denen sowohl automatisierte Fahrzeuge als auch Normalfahrer auf den Straßen zu finden sind, bei kleineren Anständen zwischen den automatisierten Fahrzeugen die Fahrstreifenwechsel für die Normalfahrer erschwert. Für die automatisierten Systeme, bei denen sich die Kapazität steigert, da erst bei einer höheren Auslastung Verkehrszusammenbrüche stattfinden (hier KHAF), steigt auch die Fahrzeit gegenüber der unbehinderten Fahrt erst bei einer höheren Belastung des Netzes.

Die Wirkung der Systeme auf die Kapazität ist auch abhängig vom Nutzungsgrad der Systeme. In Mischszenarien ist unter den getroffenen Verhaltensannahmen ein Anstieg der Kapazität meist erst bei einem Nutzungsgrad von über 50% erkennbar. Hohe Nutzungsgrade der automatisierten Systeme können zu weniger Verkehrszusammenbrüchen führen, auch wenn sich die Kapazität der Infrastruktur nicht in jedem Fall erhöht, teilweise sogar reduziert.

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich schließen, dass die Kapazität der Infrastruktur gesteigert werden kann, sofern auch geringe Fahrzeugfolgeabstände zugelassen werden dürfen. Welche Maße für die Folgeabstände und Bremsverzögerungen von automatisierten Fahrzeugen machbar und sinnvoll sind, sollte durch weitere Untersuchungen und Abstimmungen verschiedener Fachdisziplinen erfolgen.

Außerdem wurde aus den Simulationen deutlich, dass die Harmonisierung der Geschwindigkeiten von den Verkehrsteilnehmern zu einer Reduzierung von Verkehrszusammenbrüchen führen kann. Abgesehen vom Abstandsverhalten scheint auch das kooperative Verhalten beim Fahrstreifenwechsel einen massiven Einfluss auf die Kapazität der Infrastruktur zu haben.

## 7 Hochrechnung der Simulationsergebnisse

### 7.1 Methodik der Hochrechnung

Um die in Kapitel 6 ermittelten Auswirkungen auf das gesamte Fernstraßennetz hochzurechnen, wurden in Kapitel 2 die im HBS definierten Netzelemente den Elementen des Straßennetzmodells VALIDATE zugeordnet. Dann wurden die in der Simulation ermittelten veränderten Kapazitätswerte der Netzelemente im Straßennetzmodell eingesetzt. Da die Kapazität der Einfahrten, Ausfahrten und Verflechtungen vom Belastungsverhältnis zwischen der Hauptfahrbahn und Rampe abhängt (Abbildung 41), wurde in VALIDATE eine Gleichgewichts-Umlegung durchgeführt, um den Belastungsverlauf für jedes Netzelements zu ermitteln. Bei freien Strecken (zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen) wird der Strecke lediglich der neue Kapazitätswert zugeordnet.

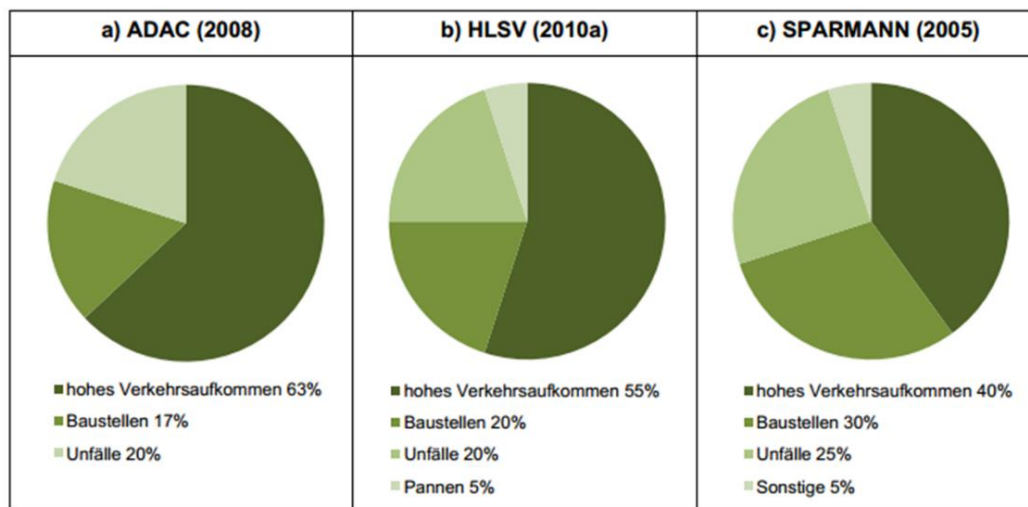
Weiter wurde in Kapitel 3 ein Flottenmodell erstellt, um die Entwicklung des Durchdringungsgrades der automatisierten Fahrzeuge im Fernstraßennetz im zeitlichen Verlauf abzuschätzen. Daraus wurden Jahresszenarien entwickelt, um die modellierten Anteile der automatisierten Fahrzeugflotte für bestimmte Jahren bestimmen zu können. So ergeben sich Mischszenarien mit bestimmten Anteilen an Normalfahrern, teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen (TAF/HAF) und kommunizierenden hochautomatisierten Fahrzeugen (kHAF). Ausgehend von der heutigen Situation (als Referenzszenario gilt das Jahr 2015) werden weitere Szenarien in 5-Jahres- bzw. 10-Jahres-Schritten berechnet. Da der Zeithorizont des Flottenmodells im Jahr 2050 endet, dient das Szenario 2050 auch als zeitlicher Horizont der Hochrechnung von Mischszenarien. Um die Auswirkungen der vollen Automatisierung (100% kHAF bzw. HAF\_extrem) untersuchen zu können, die 2050 noch nicht erreicht ist, wird ein zusätzliches Szenario "2050+" definiert. Tabelle 20 stellt die Szenarien inkl. des summierten Ausstattungsgrad der Pkw- und Lkw-Flotte dar.

**Tabelle 20** – Überblick der hochgerechneten Szenarien

Szenario	Jahr	Normalfahrer	TAF	HAF	kHAF	HAF_extrem
<i>Bezugsfall</i>	2015	<b>100%</b>	-	-	-	-
<i>Mischszenario</i>	2030	<b>74%</b>	<b>11%</b>	<b>9%</b>	<b>6%</b>	-
<i>Mischszenario</i>	2040	<b>32%</b>	<b>28%</b>	<b>22%</b>	<b>18%</b>	-
<i>Mischszenario</i>	2050	<b>12%</b>	<b>35%</b>	<b>27%</b>	<b>26%</b>	-
<i>Vollautomatisierung</i>	2050+	-	-	-	<b>100%</b>	-
<i>Extremeszenario</i>	2050+	-	-	-	-	<b>100%</b>

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Hochrechnung präsentiert. Es werden die Veränderungen zum Referenzjahr 2015 absolut und relativ berechnet. Bei der Interpretation

muss berücksichtigt werden, dass im Straßennetzmodell VALIDATE keine Baustellen oder Unfälle abgebildet werden. Die Zeitverluste in VALIDATE entstehen also nur aufgrund hohen Verkehrsaufkommens und einer daraus resultierenden Überlastung der Infrastruktur. Aus der Untersuchung des Hessischen Landesamts für Straßen- und Verkehrswesen [27] geht hervor, dass etwa 55% der Staus auf hohes Verkehrsaufkommen zurückgehen, der Rest wird von Baustellen und Unfällen verursacht. In den beiden letzten Fällen ist zwar auch eine positive Wirkung einer gesteigerten Kapazität durch Automatisierung zu erwarten, diese Gewinne sind in der hier vorgestellten Hochrechnung aber nicht enthalten.



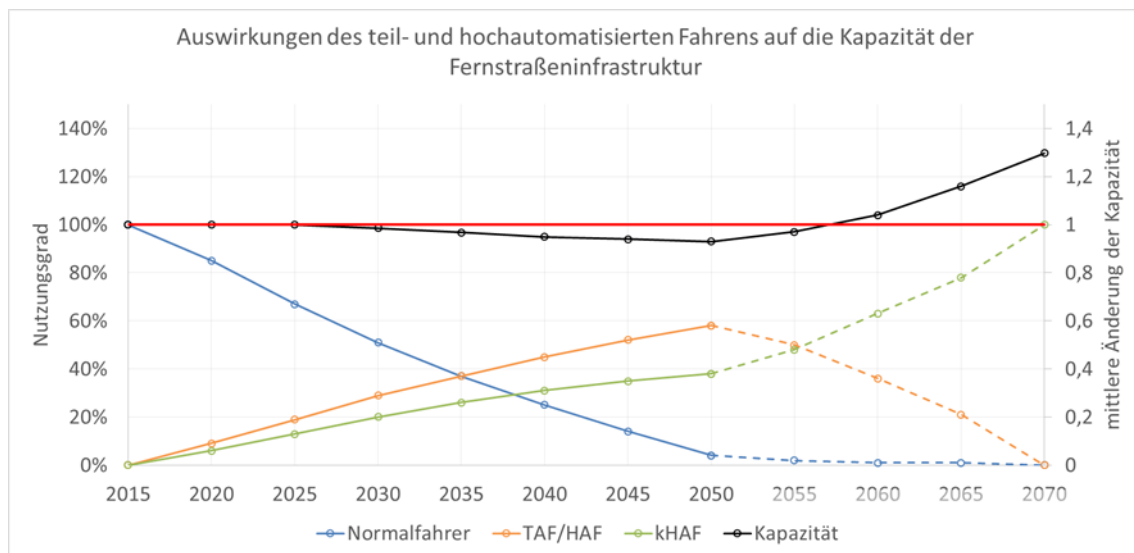
**Abbildung 58** – Untersuchungen zu den Ursachen von Staus auf Autobahnen

Weil in den Jahresszenarien keine Rebound-Effekte im Sinne von Verlagerung des Verkehrs aus dem nachgeordneten Netz auf die Autobahn und keine Änderung der Verkehrsnachfrage betrachtet werden, bleibt die Fahrleistung (ausgedrückt in Fahrzeugkilometern) über den Analysehorizont konstant. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in diesem Kapitel nur ausgewählte Auswertungen vorgestellt. Die restlichen Diagramme inkl. räumlicher Darstellung der Auswirkungen im Straßennetz befinden sich im Anhang III.

### 7.1.1 Ergebnisse der Jahresszenarien

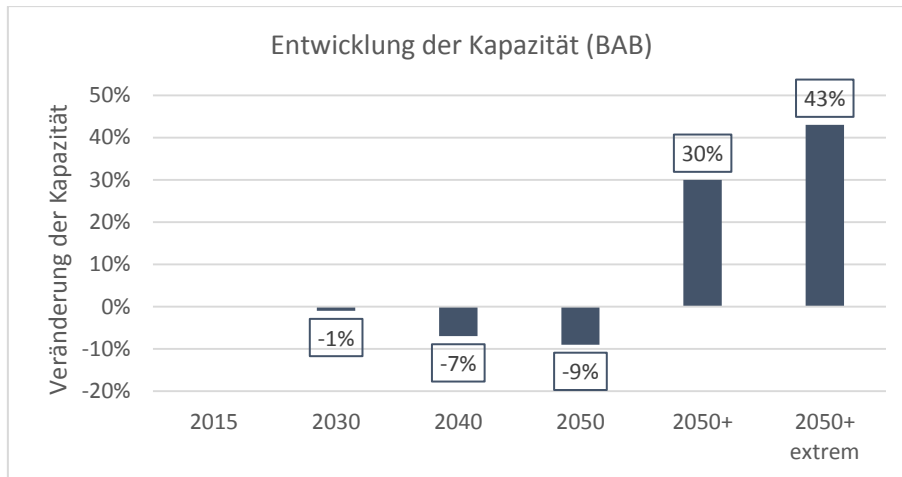
Aus der Zuordnung der Netzelemente zum Fernstraßennetz in Deutschland ergibt sich jeweils eine Menge von Netzelementen, die einer Kapazität zugeordnet werden können. Wird die Veränderung der Kapazität unter der Berücksichtigung der Häufigkeit des Netzelements im Netz und der Anteil an automatisierten Fahrzeugen im entsprechenden Jahren gewichtet, so ergibt sich im zeitlichen Verlauf eine Kurve der mittleren Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur in Deutschland (Abbildung 59). Diese mittlere gewichtete Änderung der Kapazität befindet sich zwischen 1,0 (Referenzjahr 2015) und 1,3 (Szenario Vollautomatisierung 2050+). Diese Zahl ist als aggregierte Orientierungshilfe zu verstehen,

sie berücksichtigt nicht, dass diese mittlere Kapazitätserhöhung an verschiedenen Stellen je nach Auslastung unterschiedliche Wirkung auf die Fahrzeiten haben kann. Die anfänglich negative Auswirkung auf die Kapazität ist auf die Definition der Eigenschaften von TAF/HAF und auf die Ausstattung der Fahrzeugflotte zurückzuführen: die Automatisierungsstufen TAF/HAF Flotte wirken auf die Kapazität negativ, weil für sie größere Abstände angenommen werden als beim durchschnittlichen menschlichen Fahrer. Unter der Berücksichtigung der in diesem Projekt getroffenen Annahmen sind positive Auswirkungen auf die Kapazität erst mit einem hohen Anteil an kommunizierenden hochautomatisierten Fahrzeugen festzustellen (Abbildung 59). Die größten Auswirkungen sind bei Vollautomatisierung (100% kHAF) zu erwarten: Die erreichte Größenordnung der mittleren Änderung der Kapazität beträgt +30%. Würden die Folgeabstände bei kHAF noch weiter auf 0,5 s reduziert (Szenario HAF\_extrem), ist eine mittlere Änderung der Kapazität von +43% zu erwarten. Abbildung 59 und Abbildung 60 fassen die wesentlichen Ergebnisse der Ermittlung der Kapazitätsänderung im deutschen Fernstraßennetz zusammen.



**Abbildung 59** – Zusammensetzung der teil- und hochautomatisierten Flotte und deren Auswirkungen auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur





**Abbildung 60** – Entwicklung der Kapazität auf BAB in berechneten Szenarien

Im nächsten Schritt wird berechnet, wie sich die Kapazitätsänderungen auf die Fahrzeiten auswirken. Bei freier Strecke benötigen Fahrzeuge zur Durchfahrung eines Netzelements eine bestimmte Mindestfahrzeit. Die Fahrzeit steigt dann mit der Verkehrsbelastung zunächst leicht an und steigt schließlich stark an, wenn sich die Belastung der Kapazität annähert oder diese sogar übersteigt. Die Differenz der so entstehenden tatsächlichen Fahrzeit zur Mindestfahrzeit wird Verlustzeit genannt.

Die Gesamt-Verlustzeit für das gesamte Autobahnnetz wird aus dem Produkt der Differenz der Fahrzeiten (die Fahrzeit unter freiem Verkehr und die berechnete Fahrzeit) und der Belastung aufsummiert über alle Verkehrssysteme (Pkw, Lkw) ermittelt. Um die mittlere Verlustzeit zu berechnen wird die Gesamt-Verlustzeit durch die Belastung auf der Strecke dividiert.

Im Szenario mit Vollautomatisierung (Szenario 100% kHAF) wird durch die um ca. 30% erhöhten Kapazitäten die Gesamt-Verlustzeit um 53% (von 853 Tsd. Stunden auf 320 Tsd. Stunden pro Tag) reduziert. Abbildung 61 und Abbildung 62 geben die absolute bzw. die prozentuale Änderung der Gesamtverlustzeit wieder.

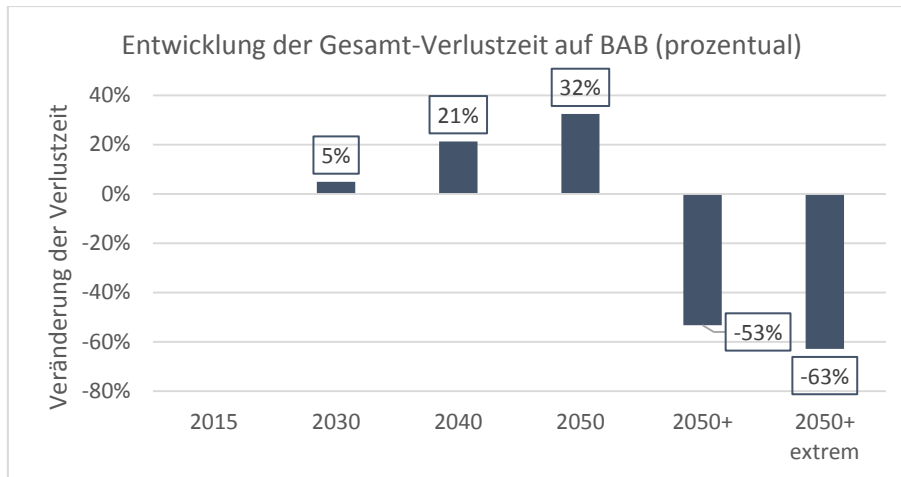


Abbildung 61 – Entwicklung der Gesamt-Verlustzeit (prozentual)

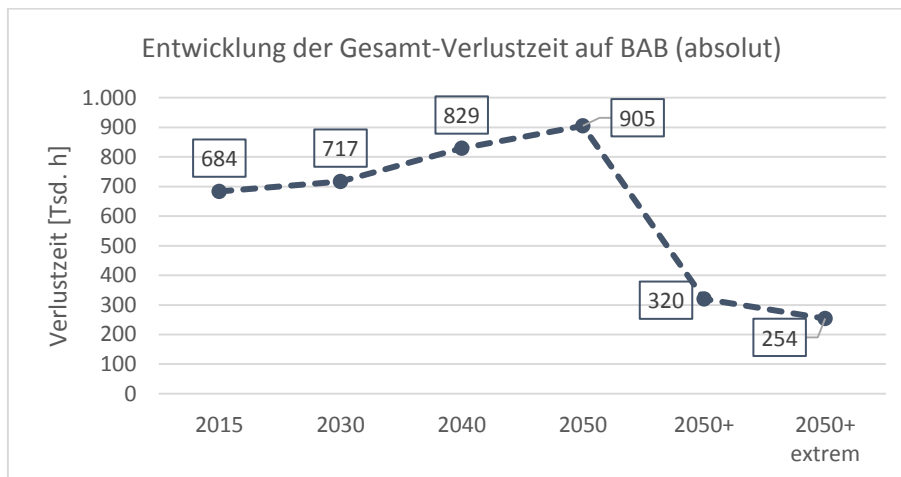
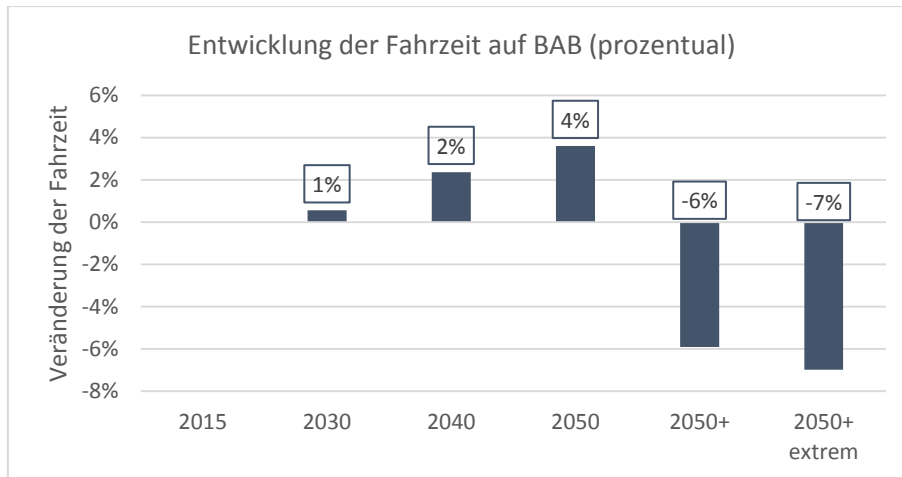


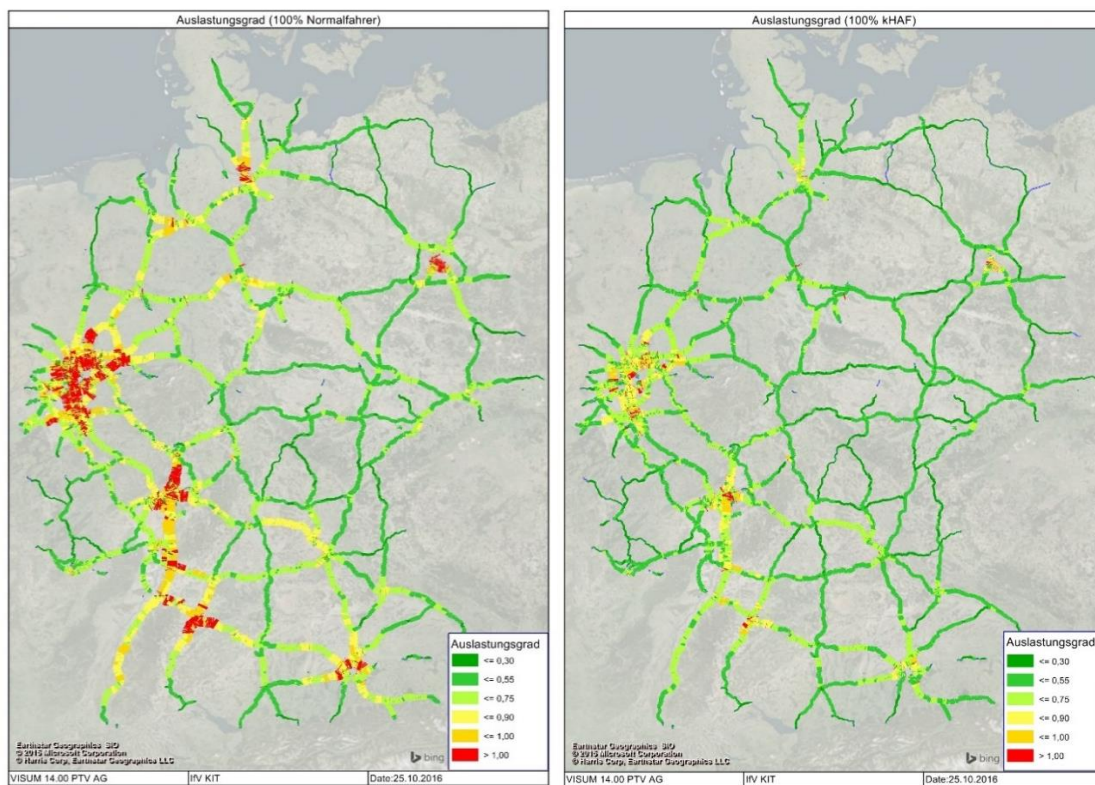
Abbildung 62 – Entwicklung der Gesamt-Verlustzeit (absolut)

Abbildung 63 stellt die Ergebnisse der Fahrzeitentwicklung dar: die Reduzierung der Verlustzeiten um ca. 53% im Szenario der Vollautomatisierung (100% KHAF) führt zu einer Reduzierung der Gesamtfahrzeiten im Autobahnnetz von 6%.



**Abbildung 63** – Entwicklung der Fahrzeit auf BAB (prozentual)

Abbildung 64 zeigt ein Vergleich des Auslastungsgrads zwischen den Szenarien 100% Normalfahrer und 100% kHAF. Besonders in den Ballungsräumen kann eine deutliche Verbesserung des Auslastungsgrads und eine damit verbundene Fahrzeitreduktion festgestellt werden.



**Abbildung 64** – Vergleich des Auslastungsgrads: 100% Normalfahrer (links) – 100% kHAF (rechts)

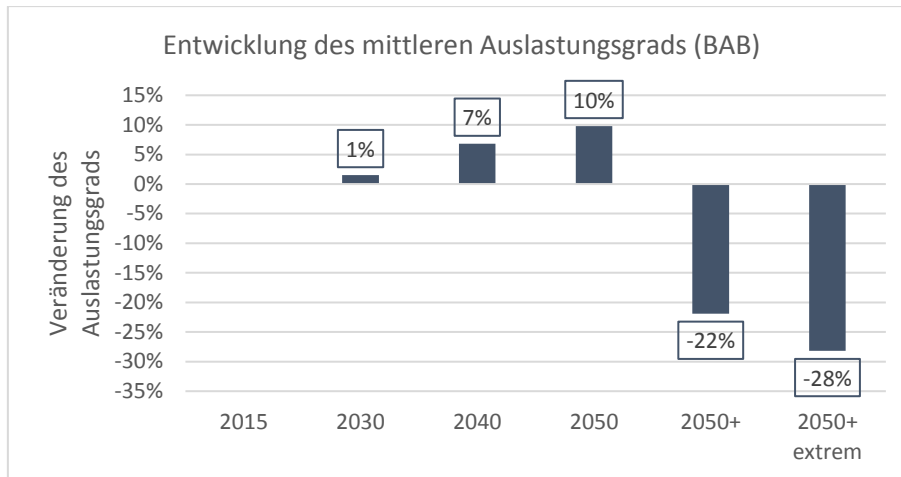


Abbildung 65 – Entwicklung des Auslastungsgrads (BAB)

### 7.1.2 Szenario „Nachfragewachstum“

Zusätzlich zu den bestehenden Szenarien wurde ein weiteres Szenario errechnet, das die offiziell prognostizierte langfristige Entwicklung des Verkehrsaufkommens in Deutschland berücksichtigt. Die Zuwachsraten der Pkw- und Lkw-Nachfrage wurden den Prognosen des aktuellen Bundesverkehrswegeplans entnommen. Die darin enthaltenen Gesamt-Zuwachsraten wurden nur pauschal auf die Nachfragematrix des VALIDATE-Modells übertragen, d.h. es wurde keine regional oder nach Quell-Ziel-Relationen differenzierte Prognose übernommen. Dies stellt eine starke Vereinfachung dar, weshalb die daraus gewonnenen Ergebnisse nur als Anhaltspunkte zu verstehen sind.

Für den Zuwachs der Pkw-Nachfrage wurde aus der Verflechtungsprognose 2030 [11] (0,2% p.a. zwischen 2010-2030) zwischen den Jahren 2015-2050+ ein Wert von 0,15% p.a. übernommen. Der Zuwachs der Lkw-Nachfrage zwischen den Jahren 2015-2050+ beträgt 0,8% p.a. und wurde aus der Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland [17] (0,9% p.a. zwischen 2005-2050) abgeleitet. In beiden Fällen wird für das Vollautomatisierungsszenario 2050+ das Jahr 2070 als Zeithorizont angenommen. Tabelle 21 fasst die langfristige Entwicklung des Verkehrsaufkommens umgerechnet auf die Nachfrage in VALIDATE zusammen:

Tabelle 21 – Abschätzung der langfristigen Entwicklung der Verkehrsnachfrage in VALIDATE

Jahr	Verflechtungsprognose		ProgTrans	Validate Nachfrage		
	PKW Zuwachsraten	LKW Zuwachsraten		PKW	LKW	Σ Nachfrage
2015	1,00		1,00	58.052.808	1.578.280	59.631.088
2020	1,01		1,04	58.633.336	1.641.411	60.274.747
2030	1,03		1,12	59.504.128	1.767.674	61.271.802
2040	1,04		1,20	60.374.920	1.893.936	62.268.856
2050	1,06		1,28	61.245.712	2.020.198	63.265.911
2050+ (2070)	1,07		1,36	62.116.505	2.146.461	64.262.965

Während bei den bisherigen Szenarien davon ausgegangen wurde, dass sich die Verkehrsströme nicht aufgrund der Kapazitätsveränderungen räumlich verlagern, wird jetzt eine neue Verkehrssumlegung, also eine neue Routenwahl der Fahrer, berechnet. Dadurch sinkt im Szenario Vollautomatisierung (100 % kHAF) ohne Verkehrssteigerung der Gewinn an Fahrzeit von 6% auf 3%. Das liegt daran, dass die freiwerdenden Kapazitäten durch die kapazitätssteigernde Wirkung der Automatisierung von Fahrzeugen genutzt werden, die aus dem untergeordneten Netz auf die Autobahn wechseln.

Unter der Annahme des beschriebenen Verkehrswachstums und ohne Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung steigt die Summe der Fahrzeit auf deutschen Bundesautobahnen um 16% auf 7,2 Mio. Fahrzeugstunden. Das Szenario der Vollautomatisierung (100 % kHAF) mindert diesen Zuwachs um 4 Prozentpunkte auf 6,9 Mio. Fahrzeugstunden, wobei dieses Szenario implizit die Verlagerung von zusätzlichem Verkehr auf das Fernstraßennetz mitbetrachtet.

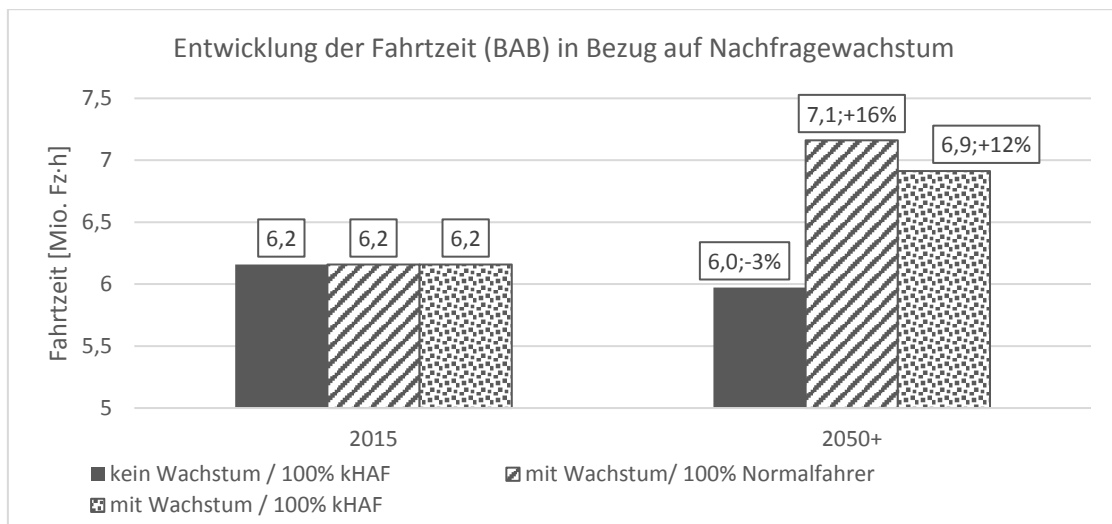


Abbildung 66 – Entwicklung der Fahrzeit (BAB) in Bezug auf Nachfragewachstum

## 8 Bewertung nach BVWP-Methodik

Aufgrund der Änderungen der Kapazität ergeben sich in den einzelnen Abschnitten des Fernstraßennetzes und im Gesamtnetz in jedem betrachteten Szenario Reisezeitänderungen gegenüber der heutigen Situation. Diese Änderungen werden volkswirtschaftlich mit einer an den Bundesverkehrswegeplan 2030 angelehnten Methodik bewertet. In diesem Bewertungsverfahren stellt die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) das wichtigste Element dar. Die NKA stellt alle aus einem Projekt entstandene Nutzen ins Verhältnis zu allen projektspezifischen Kosten, also:

$$NKV \text{ nach BVWP} = \frac{\text{Summe (N1 bis N12)}}{\text{Investitionskosten K1}}$$

Die komplette Struktur der Nutzenkomponenten N1 bis N12 sowie die Überprüfung der BVWP-Methodik ist im Methodenhandbuch des BVWP-2030 zu finden [28]. In diesem Projekt wird die Bewertung auf ausgewählte belastungs- und somit fahrzeitabhängige Komponenten der NKA beschränkt, wobei drei Nutzenkomponenten betrachtet werden: Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ), Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ) und Veränderung der Betriebskosten (NB).

### 8.1 Ausgewählte Komponente der Nutzen-Kosten-Analyse

#### 8.1.1 Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)

Der Reisezeitnutzen wird in BVWP aus der Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr in drei Bereichen ermittelt:

- Verbleibender Verkehr
- Induzierter Verkehr
- Verlagerter Verkehr

Weil in diesem Projekt keine Verlagerungs-Effekte zwischen Verkehrsmitteln und keine Induktionseffekte betrachtet werden, wird nur die Komponente des Reisezeitnutzens im verbleibenden Verkehr berücksichtigt. Dies wird gemäß der folgenden Formel saldiert:

$$NRZ = \left[ \left( \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,G,Pkw,s} \times ZWP_{DK,G} \times bg_{DK,G} \right) + \left( \sum_s \sum_{DK} \Delta FT_{DK,nG,Pkw,s} \times ZWP_{DK,nG} \times bg_{DK,nG} \right) \right] \times (-1)$$

mit

s	Index der betrachteten Strecke
DK	Distanzklasse
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr
G	Fahrtzweck Geschäft
Pkw	Fahrzeuggruppe des gesamten Pkw-Verkehrs
$ZWP_{DK,G}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Pkw-Verkehrs mit geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Abbildung 11
$bg_{DK,G}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 43
nG	nicht geschäftliche Fahrtzwecke
$ZWP_{DK,nG}$	Wertansatz je Distanzklasse für Reisezeitersparnisse des Personenverkehrs mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in €/P-Std gemäß Tabelle 23
$bg_{DK,nG}$	Besetzungsgrad je Distanzklasse für den Pkw-Verkehr mit nicht geschäftlichem Fahrtzweck in P/Fz gemäß Tabelle 43

**Abbildung 67** – Berechnung der Nutzenkomponente NRZ nach BVWP-2030

Die angesetzten Zeitwerte für Fahrten mit nicht geschäftlichem und geschäftlichem Fahrtzweck wurden aus dem BVWP-Methodenhandbuch übernommen. Aus den Zeitreihen der Auswertungen der MOP-Erhebung [13] geht hervor, dass ca. 15% der gesamten MIV-Fahrten in Deutschland mit geschäftlichem Fahrtzweck durchgeführt werden. Der gewichtete mittlere Zeitwert mit MIV für alle Fahrtzwecke über eine Distanz von 50 km wurde in nicht geschäftlichem Verkehr auf 7,35 €/Std und in geschäftlichem Verkehr auf 24,21 €/Std bestimmt. Der resultierende Reisezeitnutzen für die berechneten Szenarien sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22 – Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)

Jahr	Fahrzeit [Tsd. Fz-Std/Jahr]	Fahrzeitdifferenz [Tsd. Fz-Std/Jahr]			Wertansatz [€/Std]		Pkw-Besetzungsgrad [Pers./Pkw]		NRZ [Mio. €/Jahr]		NRZ_Summe [Mio. €/Jahr]			
		alle Fahrtzwecke	nicht geschäftlich	geschäftlich	nicht geschäftlich	geschäftlich	nicht geschäftlich	geschäftlich	nicht geschäftlich	geschäftlich				
2015	1.724.718	-	-	-					-	-	-			
2030	1.736.427	11.709	10.070	1.639					-	118,4	-	43,7	-	162,1
2040	1.774.909	50.191	43.164	7.027	7,35	24,21	1,6	1,1	-	507,6	-	187,1	-	694,7
2050	1.800.749	76.031	65.386	10.644					-	768,9	-	283,5	-	1.052,4
2050+	1.596.832	-127.886	-109.982	-17.904						1.293,4		476,8		1.770,2
2050+ (extrem)	1.573.279	-151.439	-130.237	-21.201						1.531,6		564,6		2.096,2

Tabelle 23 - Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ)

Jahr	Fahrzeit [Tsd. Fz-Std/Jahr]	Fahrzeitdifferenz [Tsd. Fz-Std/Jahr]	Zeitwert der Ladung [€/Fz-Std]	Beladungsfaktor für Lkw	NTZ [Tsd. €/Jahr]
2015	362.248	-			-
2030	362.697	449			- 2.162
2040	364.277	2.029	6,88	0,7	- 9.773
2050	365.498	3.250			- 15.653
2050+	359.061	-3.188			15.351
2050+ (extrem)	358.741	-3.507			16.892

Tabelle 24 - Veränderung der Betriebskosten (NB)

Jahr	Fahrzeit [Tsd. Fz-Std/Jahr]		Fahrzeitdifferenz [Tsd. Fz-Std/Jahr]		Vorhaltungskosten NB (VH)		Personalkosten NB (PK)		Betriebsgrundkosten NB (BGK)*	Energiekosten NB (EK)**	Summe NB [Tsd. €/Jahr]	
					Vorhaltungskosten [€/Fz-Std]		NB (VH) [Tsd. €/Jahr]	Lohnkosten für Lkw-Fahrer [€/Fz-Std]				NB (PK) [Tsd. €/Jahr]
	PKW	LKW	PKW	LKW	PKW	LKW						
2015	1.724.718	517.497	-	-			-		-	-	-	
2030	1.736.427	518.138	11.709	641			-	14.741	-	12.434	-	27.175
2040	1.774.909	520.396	50.191	2.899	0,85	7,47	-	64.306	19,39	56.211	-	120.517
2050	1.800.749	522.140	76.031	4.643			-	99.292		90.032	-	189.324
2050+	1.596.832	512.944	-127.886	-4.554				142.701		88.295	-	230.996
2050+ (extrem)	1.573.279	512.487	-151.439	-5.011				166.132		97.156	-	263.289



### 8.1.2 Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ)

Das Berechnungsverfahren des Nutzens hinsichtlich der Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr ist in Abbildung 68 dargestellt. In der Berechnungsvorschrift gehen Zeitveränderungen für die Strecken mit dem Güterverkehr über 12t zGG ein. Hier wurde der Anteil an Lkw über 12t zGG an dem Gesamtanteil des Schwerverkehrs aus den Daten zur Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen auf 70% geschätzt [29] und auf die Lkw-Nachfrage in VALIDATE übertragen. Der resultierende Nutzen ist in der Tabelle 23 gegeben.

$NTZ = \sum_s \Delta TZ_s \times zwg \times bf \times (-1)$	
mit	
s	Index der betrachteten Strecke
$\Delta TZ$	Transportzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) des Güterverkehrs mit Lkw $\geq 12t$ zGG in Tsd. Fz-Std/Jahr
zwg	Mittlerer Zeitwert der Ladung 6,88 €/Fz-Std für Lkw $\geq 12t$ zGG gemäß Kapitel III.3.1.2.2
bf	Beladungsfaktor für Lkw, entsprechend Kapitel 3.1.2.2 wird ein Wert von 0,7 angesetzt.

Abbildung 68 - Berechnung der Nutzenkomponente NTZ nach BVWP-2030

### 8.1.3 Veränderung der Betriebskosten (NB)

Als letzte Komponente wurde der Nutzen anhand der Veränderung der Betriebskosten aufgrund der Fahrzeitdifferenzen untersucht. Diese Nutzenkomponente besteht aus vier Teilkomponenten, wovon nur zwei, Vorhaltungskosten und Personalkosten, fahrzeitabhängig sind. Die spezifischen Vorhaltungskosten werden durch die Multiplikation der Fahrzeitdifferenzen zwischen den Nullfall und Bezugsfall unter der Berücksichtigung der Wertansätze folgendermaßen ermittelt:

$NB (VH) = \sum_s \sum_{FG} \Delta FT_{s,FG} \times vh_{FG} \times (-1)$	
mit	
NB (VH)	Nutzen aus Veränderung der Vorhaltungskosten
s	Index der betrachteten Strecke
FG	Index Fahrzeuggruppe
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std/Jahr <sup>89</sup>
vh	spezifische Vorhaltungskosten in €/Fz-Std gemäß Tabelle 49, Tabelle 50 und Tabelle 51
Hinweis: Die Vorhaltungskosten sind im Pkw-Verkehr nur für den geschäftlichen Fahrtzweck zu berechnen.	

Abbildung 69 - Berechnung der Nutzenkomponente NB (Vorhaltungskosten) nach BVWP-2030

Da die Fahrzeiten des geschäftlichen Pkw-Verkehrs über die Komponente NRZ in die Bewertung eingehen, werden die Personalkosten nach folgender Formel berechnet:

$$NB (PK) = \sum_s \sum_{FG} \Delta FT_{s,FG(GV)} \times pkl_{FG(GV)} \times (-1)$$

mit

NB (PK)	Nutzen aus Veränderung der Personalkosten
s	Index der betrachteten Strecke
FG(GV)	Index der betrachteten Fahrzeuggruppe (hier nur LN, LS, ZL, ZS)
$\Delta FT$	Fahrzeitdifferenz (Planfall – Bezugsfall) in Tsd. Fz-Std./Jahr <sup>91</sup>
pkl	spezifische Lohnkosten für Lkw-Fahrer in €/Fz-Std gemäß Kapitel III.3.3.2.2

**Abbildung 70** - Berechnung der Nutzenkomponente NB (Personalkosten) nach BVWP-2030

#### 8.1.4 Nicht betrachtete Komponente der Nutzen-Kosten-Analyse

##### Veränderung der Zuverlässigkeit (NZ)

Um den Einfluss der geänderten Kapazität auf die Zuverlässigkeit des Verkehrsflusses zu untersuchen kann als endogene Einflussgröße die Kapazitätsauslastung betrachtet werden. Die aus dem VALIDATE errechnete Auslastung des Netzes im Bezugsfall (2015) und allen Planfällen (2020 bis 2050+) können in einen funktionellen Zusammenhang mit der Standardabweichung der Reisezeit gestellt werden. Um die Standardabweichung der erwarteten Reisezeit zu ermitteln wird als Näherungslösung die Modellfunktion von Geistefeldt et al. [30] verwendet. Jedoch ist es erforderlich aus den Standardabweichungen der einzelnen Strecken schließlich die Standardabweichung der Gesamtrouten zu ermitteln. Es sind nach BVWP nur Routen zu betrachten, die der Verbindungsfunktionsstufe 0 oder 1 entsprechen. Die Verbindungsfunktionsstufe wird nach der Definition in Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) [31] aus der Bedeutung der Zentren, die durch Verkehrswege miteinander verbunden sind, abgeleitet. Somit würde eine weitere Differenzierung der Routen benötigt, um die Veränderung der Zuverlässigkeit in der Bewertung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Projekt werden allerdings Kapazitätsauswertungen über das gesamte Netz durchgeführt - eine Übertragung der Standardabweichungen der Reisezeiten aus Strecken in Routen ist dadurch mit einer hohen zusätzlichen Komplexität verbunden, deshalb wird auf die Komponente Zuverlässigkeit in der Bewertung verzichtet.

##### Veränderung der Verkehrssicherheit (NS)

Es kann erwartet werden, dass die Einführung automatisierten Fahrens positiv auf die Verkehrssicherheit wirkt. Eine Quantifizierung dieses Einflusses ist aber schwierig und aufwändig und

wurde deshalb nicht in dieses Projekt einbezogen. Folglich kann auch die daraus resultierende Nutzenkomponente nicht bestimmt werden.

## 8.2 Ergebnisse der Bewertung

Tabelle 25 zeigt den aus den einzelnen Komponenten aufsummierten Nutzen. Aus der Tabelle geht hervor, dass in der Übergangsphase (Mischszenarien 2030 und 2050) infolge der negativen Fahrzeitdifferenz aufgrund des hohen Anteils an TAF/HAF ein negativer volkswirtschaftlicher Nutzen von bis -1.257 Mio. €/Jahr (Mischszenario 2050) entsteht. Das Szenario der Vollautomatisierung (100%kHAF) weist aufgrund der hohen positiven Fahrzeitdifferenz innerhalb der NRZ-Komponente einen volkswirtschaftlichen Nutzen von ca. 2.016,5 Mio. €/Jahr auf. Aus den Ergebnissen der Bewertung ist es ersichtlich, dass erst ein hoher Anteil an kHAF oder Fahrverhalten mit extrem geringen Abständen (HAF\_extrem) unter den getroffenen Annahmen einen wesentlichen volkswirtschaftlichen Nutzen erzeugen.

**Tabelle 25** - Jährliche Nutzen [Mio. €/Jahr]

Szenario	Jahr	NRZ [Mio. €/Jahr]	NTZ [Mio. €/Jahr]	NB [Mio. €/Jahr]	$\Sigma$ [Mio. €/Jahr]
<i>Bezugsfall</i>	<b>2015</b>	-	-	-	-
<i>Mischszenario</i>	<b>2030</b>	-162,1	-2,2	-27,2	<b>-191,4</b>
<i>Mischszenario</i>	<b>2040</b>	-694,7	-9,8	-120,5	<b>-825,0</b>
<i>Mischszenario</i>	<b>2050</b>	-1.052,4	-15,7	-189,3	<b>-1.257,4</b>
<i>Vollautomatisierung</i>	<b>2050+</b>	1.770,2	15,4	231,0	<b>2.016,5</b>
<i>HAF_Extrem</i>	<b>2050+</b>	2.096,2	16,9	263,3	<b>2.376,4</b>

Grundsätzlich hängt die volkswirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen stark von der Höhe der angesetzten Zeitwerte ab. In dem hier angewendeten Bewertungsverfahren wurden die Zeitwerte aus dem bestehenden Methodenhandbuch für den BVWP-2030 verwendet. Somit reflektieren die Zeitwerte nicht, dass bei steigender Automatisierung Möglichkeiten entstehen, die Fahrzeit für fahrerunabhängige Tätigkeiten zu nutzen, und damit zusätzlicher zeitnutzen generiert wird. Erste Umfragen wurden bereits durchgeführt, um die Zahlungsbereitschaft sowie durch Fahrzeuginsassen ausgeführte wertschöpfende Tätigkeiten abzuschätzen [32], [33]. Allerdings liegen noch keine belastbaren quantitativen Erkenntnisse dazu vor, wie sich die Zeitwerte zukünftig aufgrund der steigenden Automatisierung der Fahrzeugflotte ändern werden.

## 9 Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Wirkungsermittlung von teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur Deutschlands. Die Methodik sieht vor, zunächst Teilelemente des Fernstraßennetzes simulationsgestützt zu untersuchen und darauf basierend eine Hochrechnung auf die gesamte deutsche Fernstraßeninfrastruktur vorzunehmen. Hierfür werden zunächst Definitionen und Rahmenbedingungen für die Simulation von automatisierten Fahrzeugen festgelegt. Diese beinhalten die folgenden Aspekte:

- Es wird nur das Bundesautobahnnetz betrachtet, in der Simulation wird eine Auswahl typischer Autobahnnetzelemente modelliert.
- Es werden verschiedene Typen automatisierter Fahrzeuge betrachtet, teilautomatisierte (TAF), hochautomatisierte (HAF) und kommunizierende hochautomatisierte Fahrzeuge (kHAF). Während TAF keine automatisierten Fahrstreifenwechsel vornehmen können, ist dies bei HAF und kHAF möglich. Weitere Unterscheidungen (z.B. nach Herstellern) werden nicht getroffen.
- Für das Fahrverhalten gilt: Alle automatisierten Fahrzeuge müssen sich stets an die Richtgeschwindigkeit sowie das Rechtsfahrgebot halten, TAF und HAF müssen zusätzlich stets einen Mindestabstand von 1,8 Sekunden („halber Tacho“) zu ihrem Vorderfahrzeug einhalten, kHAF können diesen Abstand auf 0,9 Sekunden reduzieren, sofern das Vorderfahrzeug ebenfalls des Typs kHAF ist. Analoges gilt für Fahrstreifenwechsel.

Auf Basis dieser Rahmenbedingungen folgt die simulative Ermittlung der Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Kapazität von isoliert betrachteten Netzelementen des Fernstraßennetzes.

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich schließen, dass die Kapazität der Infrastruktur gesteigert werden kann, sofern die Funktion der automatisierten Fahrzeuge es erlaubt, dass auch geringe Fahrzeugfolgeabstände zugelassen werden. Somit können auf einigen Netzelementen Kapazitätssteigerungen von über 35% verzeichnet werden. Ein Verhalten, welches nur große Abstände zwischen den Fahrzeugen zulässt, wirkt negativ auf die Kapazität der Infrastruktur. Außerdem wird aus den Simulationen deutlich, dass die Harmonisierung der Geschwindigkeiten von den Verkehrsteilnehmern zu einer Reduzierung von Verkehrszusammenbrüchen führen kann. Abgesehen vom Abstandsverhalten scheint auch das kooperative Verhalten beim Fahrstreifenwechsel einen massiven Einfluss auf die Kapazität der Infrastruktur zu haben.

Um die Wirkungen der Kapazitätsveränderungen auf das gesamte Autobahnnetz hochzurechnen, wird ein Flottenmodell entwickelt, das den zeitlichen Verlauf der Ausstattungsraten der

Fahrzeuge für die verschiedenen Automatisierungsstufen abschätzt. Die Annahmen dieses Modells basieren auf der bisherigen Altersverteilung der Flotte und der historischen Entwicklung der Durchdringungsraten von Assistenzsystemen, die bereits verfügbar sind. Mit diesem Flottenmodell wurde die Fahrzeugzusammensetzung einschließlich der Automatisierungsgrade für verschiedene Prognosejahre bis 2050 bestimmt. Das Flottenmodell lässt sich gegebenenfalls leicht an geänderte Rahmenbedingungen anpassen und ermöglicht eine einfache erneute Berechnung der Flottenzusammensetzung, sobald neue Erkenntnisse vorliegen.

Die Kapazitätsänderungen, die durch Simulation auf isolierten Netzelementen berechnet wurden, wurden auf das gesamte Autobahnnetz übertragen, indem jeder Abschnitt dieses Netzes einem simulierten Netzelement zugeordnet wurde. Betrachtet man die mittlere Kapazitätsänderung im Netz über die Zeit, zeigt sich der gleiche Effekt wie schon bei den isoliert betrachteten Netzelementen: Erst bei Erreichen eines sehr hohen Anteils von Fahrzeugen mit kommunizierender Automatisierung (kHAF) können Kapazitätsgewinne erzielt werden. Bei Vollausstattung beträgt der mittlere Kapazitätsgewinn im Netz ca. 30 %. In den Jahren vorher, die durch hohe Anteile nicht-kommunizierender Fahrzeuge (TAF/HAF) gekennzeichnet sind, sind dagegen im Mittel leichte Kapazitätsverluste zu erwarten.

Auf das Netz mit den geänderten Kapazitäten wurde dann die (heutige) Verkehrsnachfrage umgelegt, um die entstehenden Fahrzeiten und insbesondere die Verlustzeiten zu berechnen. Die Entwicklung der Verlustzeiten folgt dem zeitlichen Verlauf der Kapazitätsentwicklung. Im Zustand der Vollausstattung mit kommunizierender Automatisierung (kHAF) bewirken die Kapazitätsgewinne eine Reduzierung der Verlustzeiten durch verkehrliche Überlastung (ohne Unfälle und Baustellen) um über die Hälfte. Damit werden 6 % der gesamten Fahrzeiten im Autobahnnetz eingespart.

Schließlich wurde eine volkswirtschaftliche Bewertung durchgeführt, bei der die Zeitgewinne im Personen und Güterverkehr mit den Kostensätzen der Bundesverkehrswegeplanung monetarisiert wurden. Die erreichbare Reduzierung der Fahrzeiten entspricht darin einer Einsparung von ca. 2 Milliarden Euro pro Jahr.

Die komplette Studie wurde modular aufgebaut sodass einzelne Module (Fahrzeugflottenmodell, Straßennetz-Operationen, mikroskopische Untersuchungen) an den aktuellsten Stand der Empirie bzw. Prognosen angepasst werden können. So kann das Modell immer mit den aktuellsten Erkenntnissen aus der Autoindustrie und Verkehrsforschung aktualisiert werden.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] FGSV, *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*, Köln: FGSV, 2015.
- [2] Verband der Automobilindustrie, „Schritt für Schritt in die Zukunft,“ [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/schritt-fuer-schritt-in-die-zukunft.html>. [Zugriff am 2015 10 13].
- [3] Verband der Automobilindustrie, „Automatisiertes Fahren,“ [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html>. [Zugriff am 13 10 2015].
- [4] J. Geistefeldt et. al., *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, Forschungsauftrag FE03.0460/2009/OGB*, Bergisch Gladbach: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 279, 2016.
- [5] PTV Group, *PTV Vissim 7 Benutzerhandbuch*, Karlsruhe, 2015.
- [6] IVT Research GmbH; DLR, *Fahrleistungserhebung 2014: Forschungsprojekt FE 82.0584/2013*, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2016 (nicht veröffentlicht).
- [7] FGSV, *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)*, Köln: FGSV, 2008.
- [8] N. Lensing, *Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2008*, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2008.
- [9] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Fahrzeugalter*, Flensburg: KBA, 2015.
- [10] Bundesamt für Güterverkehr (BAG), „Mautstatistik: Jahrestabellen 2015,“ Bundesamt für Güterverkehr, Köln, 2015.
- [11] Intraplan Consult GmbH, „Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Zusammenfassung der Ergebnisse,“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2014.
- [12] Shell Deutschland, Prognos AG, „Shell PKW-Szenarien bis 2040,“ Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2014.

- [13] C. Weiß, B. Chlond, T. Hilgert und P. Vortisch, *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2014/2015: Alltagsmobilität und Fahrleistung*, Karlsruhe, 01/2016.
- [14] Kraftfahrt-Bundesamt, *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Verkehrsaufkommen*, Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2014.
- [15] Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, *Strategia Rozwoju Transportu do 2020 Roku (z perspektywa do 2030 roku): Schlussbericht*, Warszawa, 2012.
- [16] Tschechischer Statistischer Amt, *Entwicklung des Güterverkehrs differenziert nach Verkehrsmittel (2015)*, abgerufen aus: <https://vdb.czso.cz> am 15.4.2016.
- [17] ProgTrans AG, *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050: Schlussbericht*, Basel: im Auftrag von Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung unter Projekt-Nr. 26.0185/2006, 2007.
- [18] J. Waskiewicz und Z. Chlopek, „Proгноza Zapotrzebowania Nosnikow Energii przez Polski Park Samochodow Uzytkowych w Latach 2015-2030,“ *Transport Samochodowy*, 4 2013.
- [19] European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC), *Automated Driving Roadmap*, Brussels: ERTRAC, 2015.
- [20] B. Gottschalk, R. Kalmbach und J. Dannenberg, *Markenmanagement in der Automobilindustrie: Die Erfolgsstrategien internationaler Top-Manager*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [21] W. Bernhart, *Autonomous Driving: Think Act*, München: Roland Berger Strategy Consultants GmbH., 2014.
- [22] M. Mauer, J. Gerdes, B. Lenz und W. Hermann, *Autonomes Fahren*, Springer, 2015.
- [23] B. Chlond, C. Weiss, M. Heilig und P. Vortisch, „Hybrid Modeling Approach of Car Uses in Germany on Basis of Empirical Data with Different Granularities,“ *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 2412, pp. 67-74, 2014, Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2412-08>.
- [24] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), *Verkehr in Kilometern: Durchschnittliche Fahrleistung auf Vorjahresniveau*, Flensburg: KBA, 2015.

- 
- [25] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 5th Edition, New York: Free Press, 2003.
- [26] FGSV, *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflussimulation - Grundlagen und Anwendung*, FGSV-Verlag, 2006.
- [27] Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), *Staubilanz Hessen*, Groß-Gerau, 2010.
- [28] PTV Group; TCI Röhling, Hans-Ulrich Mann, *Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030; FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015*, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 2016.
- [29] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Daten zur Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, Internetpräsenz: <http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html>, 2015.
- [30] J. Geistefeldt, S. Hohmann und N. Wu, *Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Straße*, Bonn: BMVI, 2014.
- [31] FGSV, *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN)*, Köln: FGSV, 2008.
- [32] Fraunhofer IAO; Horváth & Partners, *The Value of Time: Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren*, abgerufen am 2016-10-24 aus [https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value\\_of\\_time.pdf](https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value_of_time.pdf), 2016.
- [33] R. Cyganski, E. Fraedrich und B. Lenz, *Travel-time Valuation for Automated Driving: A Use-case-driven Study*, Washington D.C.: Proceedings of the 94th Annual Meeting of the TRB, 2015.
- [34] Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 15. September 2015 (BGBl. I S. 1573) geändert worden ist.
- [35] Bußgeldkatalog-Verordnung (BKatV) vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919), der zuletzt durch Artikel 1 Nummer 3 des Gesetzes vom 19. Juli 2007 (BGBl. I S. 1460) geändert worden ist.



## 11 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1 – Methodik für die Bearbeitung des Forschungsprojektes .....	2
Abbildung 2 - Stufen des automatisierten Fahrens [3] .....	5
Abbildung 3 – Komponenten der automatisierten Fahrfunktionen .....	8
Abbildung 4 – kumulierte Häufigkeiten der Geschwindigkeiten der Normalfahrer und hochautomatisierten Fahrzeuge in der Freifahrt.....	9
Abbildung 5 – kumulierte Häufigkeiten der Geschwindigkeiten der Normalfahrer und automatisierten Nutzfahrzeuge in der Freifahrt .....	10
Abbildung 6 - Zeitlücken verschiedener Ausprägungen automatisierten Fahrens in der Folgefahrt zu einem Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit .....	12
Abbildung 7 – Darstellung des Abstandsverhaltens des automatisierten Fahrzeugs je nach Ausstattung und Vorderfahrzeug.....	13
Abbildung 8 – Fahrstreifenwechsel eines automatisierten Fahrzeugs nach links.....	13
Abbildung 9 - Fahrstreifenwechsel eines automatisierten Fahrzeugs nach rechts.....	14
Abbildung 10 – Darstellung der kooperativen Verzögerung, Bild aus [5].....	14
Abbildung 11 – Darstellung eines kooperativen Fahrstreifenwechsels, Bild aus [5] .....	14
Abbildung 12 – Straßennetzmodell VALIDATE (links), betrachtetes Straßennetz (rechts).....	23
Abbildung 13 – Auslastung des BAB-Netzes .....	24
Abbildung 14 – Zuordnung der HBS-Elemente - Knotenpunkt (links), freie Strecke (rechts) .....	25
Abbildung 15 – Typen von Einfahrten nach HBS 2015 [1] .....	26
Abbildung 16 – Typen von Verflechtungsstrecken nach HBS 2015 [1] .....	27
Abbildung 17 – Zuordnung der Einfahrten nach HBS-Typ zum Bundesautobahnnetz.....	28
Abbildung 18 – Workflow des Fahrzeugflottenmodells.....	31
Abbildung 19 – Pkw-Bestand in Deutschland (1960-2050) [9] .....	33
Abbildung 20 – Pkw-Neuzulassungen in Deutschland (1996-2015) [9] .....	33
Abbildung 21 – Oldtimer Bestand in Deutschland (2001-2013) [9] .....	34
Abbildung 22 – verfügbare KBA-Daten (weiß) und Prognose (gelb) der Fahrzeugflotte in Deutschland (1980-2050) .....	35
Abbildung 23 – Fahrleistung von mautpflichtigen Nutzfahrzeugen in Deutschland nach Zulassungsstaaten [10].....	36
Abbildung 24 – Anteil der Fahrleistung in Schadstoffklassen [10] .....	37
Abbildung 25 – Emissionskennzahl der Mautfahrzeuge (2015) [10] .....	37
Abbildung 26 – Lkw-Neuzulassungen in Deutschland (1995-2015) [9] .....	38
Abbildung 27 – Lkw-Bestand in Polen differenziert nach dem zulässigen Gesamtgewicht: unter 3,5 t (lila), über 3,5 t (blau) [18].....	39
Abbildung 28 – Lkw-Bestand in Deutschland (1995-2050).....	40
Abbildung 29 – verfügbare KBA-Daten (weiß) und Prognose (gelb) der Mautfahrzeuge in Deutschland (1980 – 2050) .....	40
Abbildung 30 – ABS- / ESP- Marktdurchdringung in West-Europa [20] .....	41
Abbildung 31 – Geschätzte Marktdurchdringung der einzelnen Assistenzsysteme in Deutschland [21], [22] .....	43

---

Abbildung 32 – Durchdringung der Automatisierung im Pkw-Bestand .....	45
Abbildung 33 – Durchdringung der Automatisierung in Lkw-Bestand .....	47
Abbildung 34 – Tagesfahrleistung der Pkw-Flotte in Deutschland (CUMILE).....	49
Abbildung 35 –Tagesfahrleistung der Pkw-Flotte im Di-Do Verkehr in Deutschland (CUMILE) .....	49
Abbildung 36 – Personengruppen nach dem Grad ihrer Innovativität [25].....	50
Abbildung 37 – BAB-Jahresfahrleistung der zugeordneten MOP-Flotte.....	52
Abbildung 38 – Durchdringung der teil- und hochautomatisierten Fahrzeuge im gesamten Netz (durchgezogene Linie) und Fernstraßennetz (gepunktete Linie) .....	53
Abbildung 39 – Bestandteile aus denen sich die Untersuchungsszenarien der Simulationsstudie ergeben .....	54
Abbildung 40 – Wirkungsgrade verschiedener Systeme und zugehörige simulierte Nutzungsgrade.....	55
Abbildung 41 - Belastungsverhältnisse für das Simulationsexperiment einer Einfahrt E1-2 an zweistreifiger Hauptfahrbahn (aus [4]) .....	57
Abbildung 42 - Verkehrsnachfrageganglinie innerhalb der Simulation (rote Linie= Kapazität laut HBS) ...	58
Abbildung 43 – Bestimmung der Kapazität anhand des Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramms ....	60
Abbildung 44 – alternative Bestimmung der Kapazität.....	61
Abbildung 45 – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramme für unterschiedliche Szenarien jeweils auf dem Netzelement E1-2 mit dem Belastungsverhältnis 5.....	62
Abbildung 46 – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 4 relativ zum Basisszenario „100% Normalfahrer“ .....	63
Abbildung 47 – Entwicklung der Kapazitätswerte für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 4 relativ zum Basisszenario ab einem Nutzungsgrad von 50%.....	64
Abbildung 48 – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm mit zugehörigem Histogramm der Geschwindigkeiten für das Netzelement zweistreifiger Streckenabschnitt mit 100% kHAF.....	65
Abbildung 49 - Kapazitäten und Kapazitätsänderungen für das Netzelement A2-3 Belastungsverhältnis 3 relativ zum Basisszenario „100% Normalfahrer“ .....	66
Abbildung 50 – Netzelement Verflechtung des Typs VR1 nach RAA [7] .....	66
Abbildung 51 – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen des Netzelements VR1-1 für die Belastungsverhältnisse 2 und 6 relativ zum Basisszenario .....	67
Abbildung 52 – Kapazitäten und Kapazitätsänderungen auf zwei- bzw. dreistreifigen Streckenabschnitten .....	68
Abbildung 53 – Kapazitätsänderung für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 3 für unterschiedliche Systeme incl. Extremszenarien .....	69
Abbildung 54 – Kapazitätsänderung für das Netzelement E1-2 Belastungsverhältnis 2 für die Zukunftsszenarien.....	70
Abbildung 55 – Mittlere Fahrzeit auf der Hauptfahrbahn des Netzelements E1-2 für unterschiedliche Szenarien .....	71
Abbildung 56 – Mittlere Fahrzeit auf der Einfahrt des Netzelements E1-2 für unterschiedliche Szenarien	71
Abbildung 57 – Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramm des Netzelements E1-2 mit dem Belastungsverhältnis 2 mit 100% kHAF für den Fall a) Geschwindigkeitsbeschränkung der Lkw = 80km/h und b) Geschwindigkeitsbeschränkung der Lkw = 100km/h .....	72
Abbildung 58 – Untersuchungen zu den Ursachen von Staus auf Autobahnen.....	75

<i>Abbildung 59 – Zusammensetzung der teil- und hochautomatisierten Flotte und deren Auswirkungen auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur</i> .....	76
<i>Abbildung 60 – Entwicklung der Kapazität auf BAB in berechneten Szenarien</i> .....	77
<i>Abbildung 61 – Entwicklung der Gesamt-Verlustzeit (prozentual)</i> .....	78
<i>Abbildung 62 – Entwicklung der Gesamt-Verlustzeit (absolut)</i> .....	78
<i>Abbildung 63 – Entwicklung der Fahrzeit auf BAB (prozentual)</i> .....	79
<i>Abbildung 64 – Vergleich des Auslastungsgrads: 100% Normalfahrer (links) – 100% kHAF (rechts)</i> .....	79
<i>Abbildung 65 – Entwicklung des Auslastungsgrads (BAB)</i> .....	80
<i>Abbildung 66 – Entwicklung der Fahrzeit (BAB) in Bezug auf Nachfragewachstum</i> .....	81
<i>Abbildung 67 – Berechnung der Nutzenkomponente NRZ nach BVWP-2030</i> .....	83
<i>Abbildung 68 - Berechnung der Nutzenkomponente NTZ nach BVWP-2030</i> .....	85
<i>Abbildung 69 - Berechnung der Nutzenkomponente NB (Vorhaltungskosten) nach BVWP-2030</i> .....	85
<i>Abbildung 70 - Berechnung der Nutzenkomponente NB (Personalkosten) nach BVWP-2030</i> .....	86
<i>Abbildung 71 – Auslastungsgrad (Szenario 100% Normalfahrer)</i> .....	151
<i>Abbildung 72 – Auslastungsgrad (Szenario 100% kHAF)</i> .....	152
<i>Abbildung 73 – Vergleich der Fahrzeit (100% kHAF – 100% NF)</i> .....	153
<i>Abbildung 74 – Entwicklung der Fahrzeit (absolut)</i> .....	154
<i>Abbildung 75 – Entwicklung der mittleren Verlustzeit (prozentual)</i> .....	154
<i>Abbildung 76 – Entwicklung der mittleren Verlustzeit (absolut)</i> .....	154
<i>Tabelle 1 – Parametertabelle Fahrzeugfolgeverhalten</i> .....	16
<i>Tabelle 2 – Parametertabelle Fahrstreifenwechselverhalten</i> .....	19
<i>Tabelle 3 – Verteilungen für die Fahrzeuge innerhalb der Simulation</i> .....	21
<i>Tabelle 4 – Verteilung der QSV im BAB-Netz in VALIDATE</i> .....	24
<i>Tabelle 5 – Statistik der freien Strecken im Straßennetzmodell VALIDATE</i> .....	27
<i>Tabelle 6 – Statistik der HBS-Elemente in 97%-Perzentil des deutschen BAB-Netz</i> .....	28
<i>Tabelle 7 – Betrachtete HBS Netzelemente</i> .....	29
<i>Tabelle 8 – Fahrleistung differenziert nach Fahrzeugalter [13]</i> .....	34
<i>Tabelle 9 – gemittelte Wirtschaftsindikatoren p.a. in Jahren 2010-2014</i> .....	38
<i>Tabelle 10 – Zuordnung der Assistenzsysteme zu den Automatisierungsstufen</i> .....	42
<i>Tabelle 11 – Geschätzte Marktdurchdringung der PKW-Assistenzsysteme in Deutschland</i> .....	43
<i>Tabelle 12 – Geschätzte Durchdringung der Automatisierungsstufen in der deutschen Pkw-Flotte</i> .....	44
<i>Tabelle 13 – Geschätzte Marktdurchdringung der Lkw-Assistenzsysteme in der Lkw-Flotte</i> .....	46
<i>Tabelle 14 – Geschätzte Durchdringung der Automatisierungsstufen in der Lkw-Flotte</i> .....	46
<i>Tabelle 15 – Übernahmezeitpunkt der Technologie von verschiedenen Personengruppen</i> .....	50
<i>Tabelle 16 – Übersicht der regelbasierten Zuordnung der Automatisierung zur MOP-Flotte</i> .....	51
<i>Tabelle 17 – Zuschläge für die Zusammensetzung der automatisierte Flotte auf der BAB</i> .....	52
<i>Tabelle 18 – Geschätzter Ausstattungsgrad der Systeme in der deutschen PKW-Flotte</i> .....	69
<i>Tabelle 19 – Geschätzte Ausstattungsgrad von Systeme in der deutschen LKW-Flotte</i> .....	69
<i>Tabelle 20 – Überblick der hochgerechneten Szenarien</i> .....	74
<i>Tabelle 21 – Abschätzung der langfristigen Entwicklung der Verkehrsnachfrage in VALIDATE</i> .....	80
<i>Tabelle 22 – Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr (NRZ)</i> .....	84

---

<i>Tabelle 23 - Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr (NTZ) .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 24 - Veränderung der Betriebskosten (NB) .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 25 - Jährliche Nutzen [Mio. €/Jahr] .....</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 26 – Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-2 .....</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 27 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-3 .....</i>	<i>100</i>
<i>Tabelle 28 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-4 .....</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 29 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A1-2 .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabelle 30 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A2-3 .....</i>	<i>110</i>
<i>Tabelle 31 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A4-2 .....</i>	<i>114</i>
<i>Tabelle 32 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement VR1-1 .....</i>	<i>118</i>
<i>Tabelle 33 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n2 .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 34 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n3 .....</i>	<i>123</i>
<i>Tabelle 35 – Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-2 .....</i>	<i>124</i>
<i>Tabelle 36 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-3 .....</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 37 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-4 .....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 38 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A1-2 .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 39 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A2-3 .....</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 40 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A4-2 .....</i>	<i>141</i>
<i>Tabelle 41 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement VR1-1 .....</i>	<i>145</i>
<i>Tabelle 42 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n2 .....</i>	<i>149</i>
<i>Tabelle 43 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n3 .....</i>	<i>150</i>

## 12 Anhang I

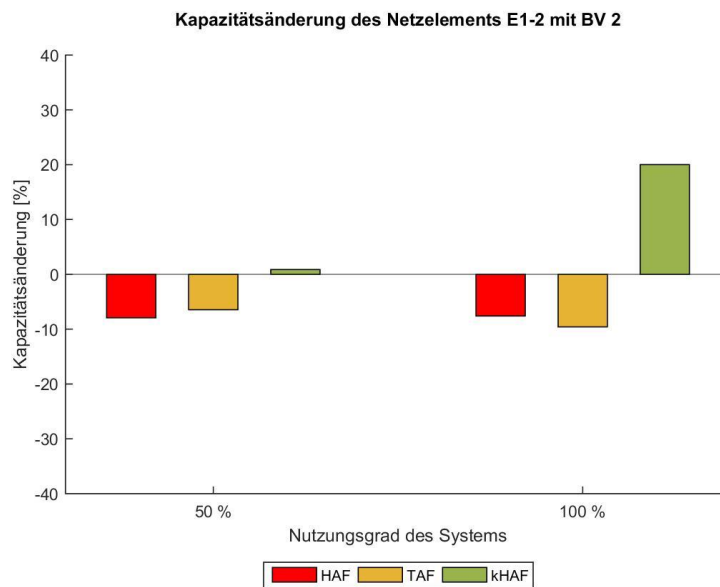
Im Folgenden sind alle Einzelergebnisse für die simulierten Untersuchungsszenarien, nach Netzelement geordnet, darstellt.

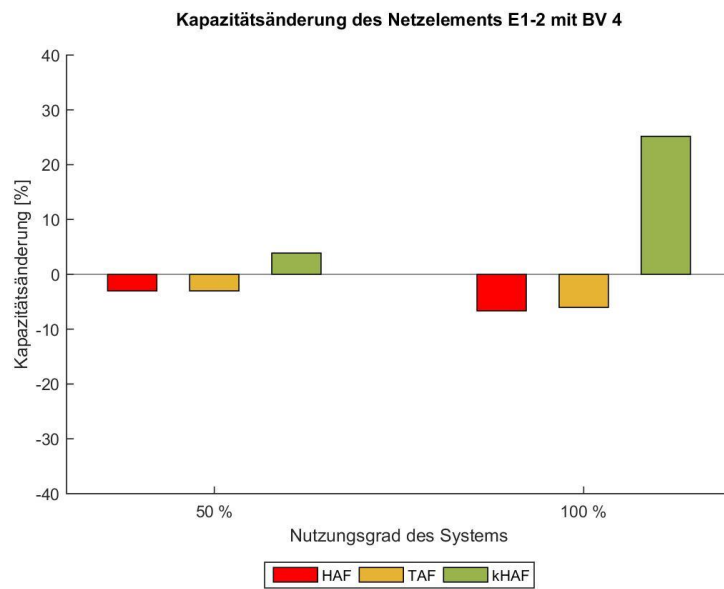
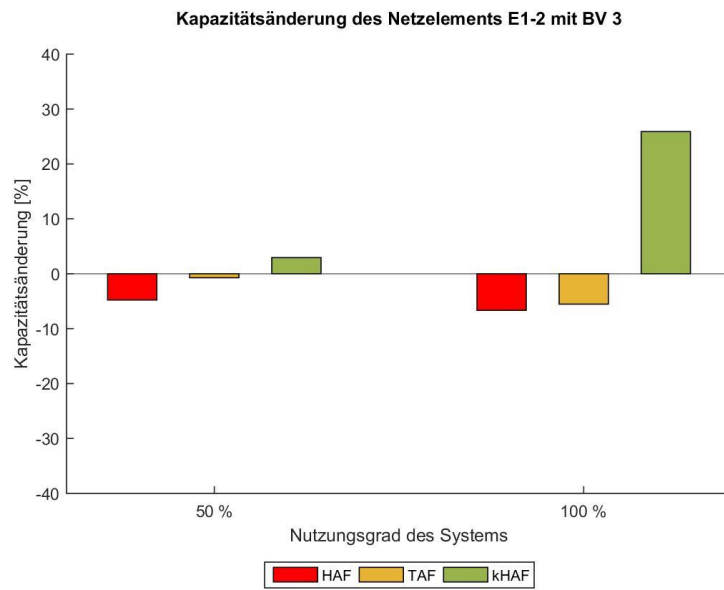
### E1-2

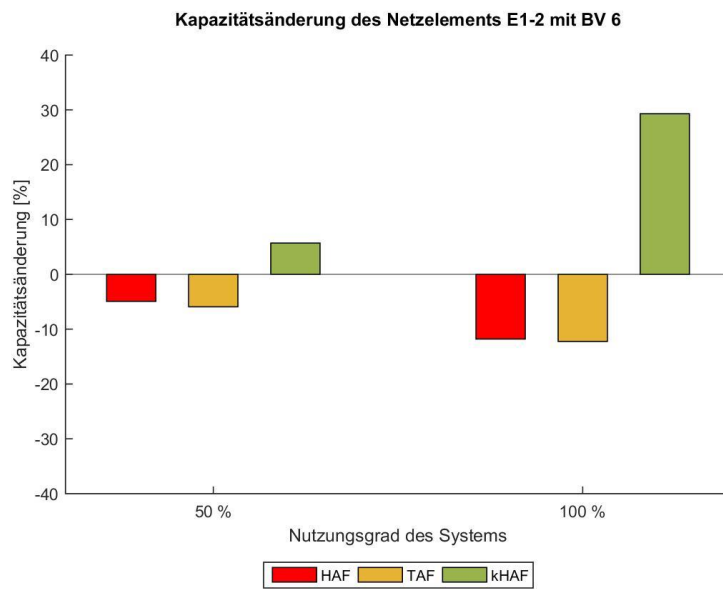
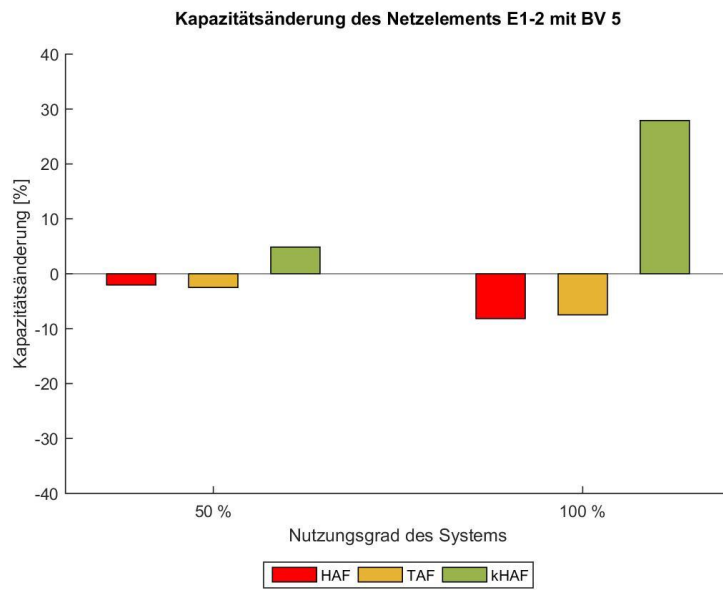


**Tabelle 26** – Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-2

E1-2 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis				
	2	3	4	5	6
<b>Szenarien</b>					
<b>100 % Normalfahrer</b>	3764	3848	3942	4052	4223
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	3466	3664	3823	3969	4015
<b>100 % HAF</b>	3478	3592	3680	3721	3725
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	3521	3820	3823	3951	3973
<b>100% TAF</b>	3403	3635	3704	3749	3706
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	3797	3961	4095	4249	4464
<b>100 % kHAF</b>	4517	4844	4934	5183	5460







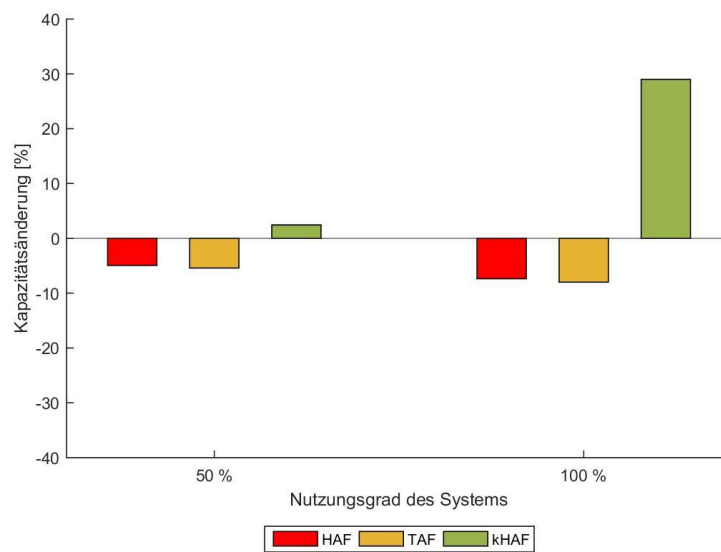
## E1-3



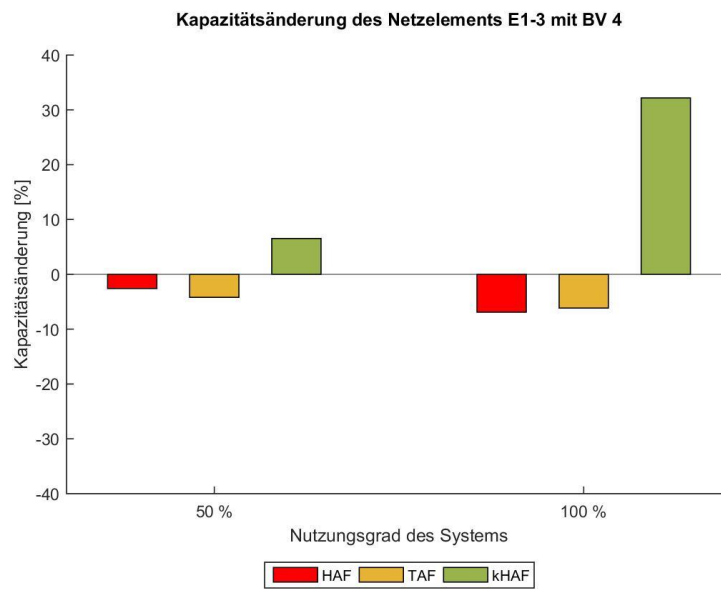
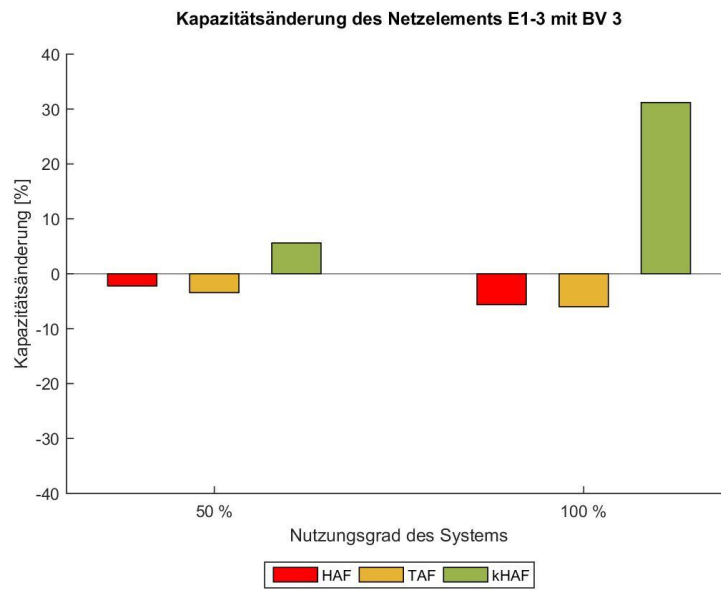
Tabelle 27 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-3

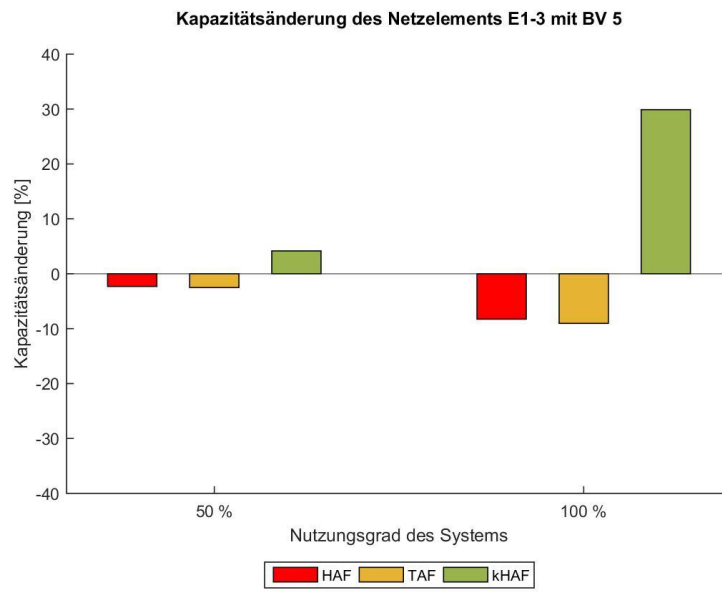
E1-3 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis			
	2	3	4	5
<b>100 % Normalfahrer</b>	5650	5778	5861	6070
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	5371	5650	5710	5930
<b>100 % HAF</b>	5234	5453	5457	5568
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	5344	5579	5615	5917
<b>100 % TAF</b>	5199	5431	5501	5522
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	5788	6102	6244	6323
<b>100 % kHAF</b>	7288	7580	7747	7884

Kapazitätsänderung des Netzelements E1-3 mit BV 2







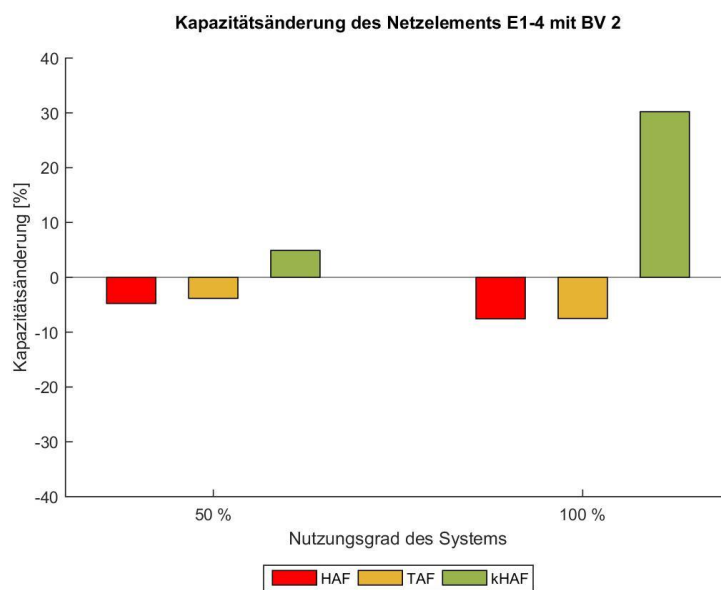


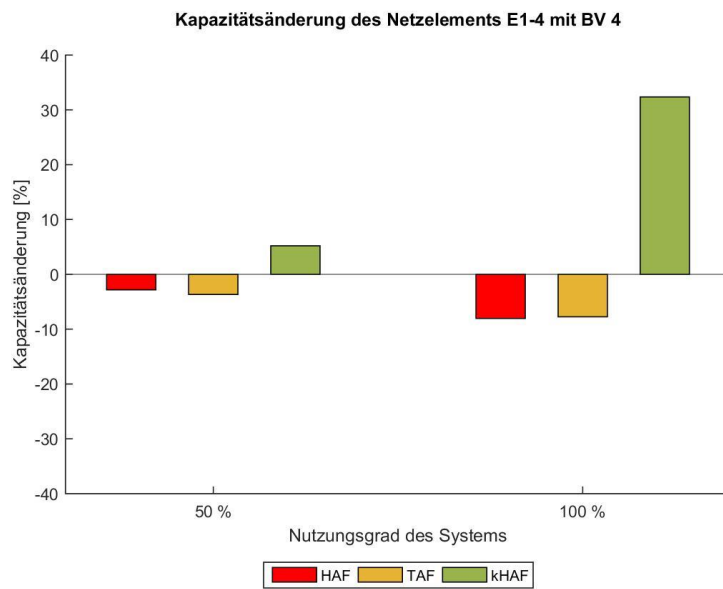
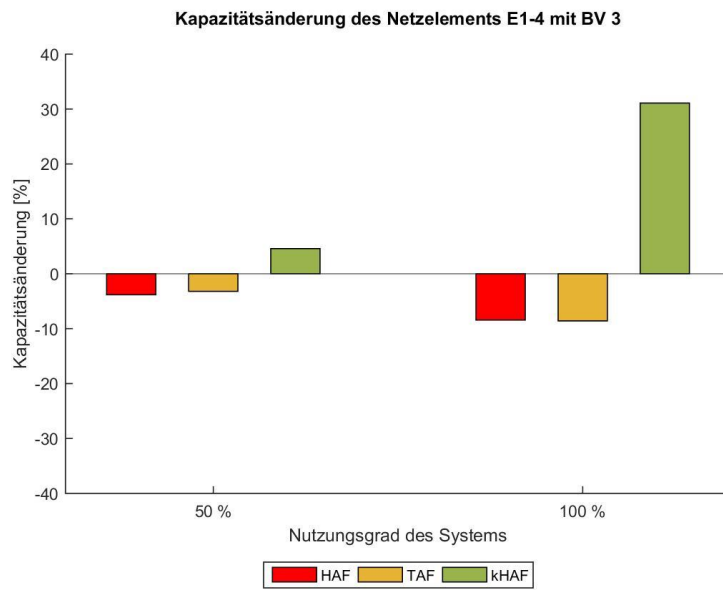
**E1-4**

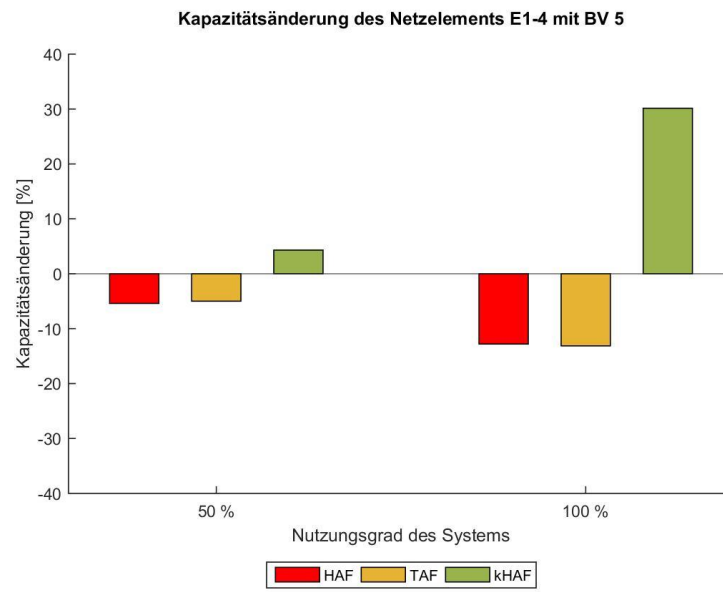


**Tabelle 28** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-4

E1-4 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis			
	2	3	4	5
<b>100 % Normalfahrer</b>	7544	7736	7807	8141
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	7185	7440	7587	7702
<b>100 % HAF</b>	6975	7084	7180	7100
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	7255	7488	7520	7735
<b>100% TAF</b>	6978	7072	7202	7072
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	7914	8091	8213	8492
<b>100 % kHAF</b>	9822	10141	10333	10595







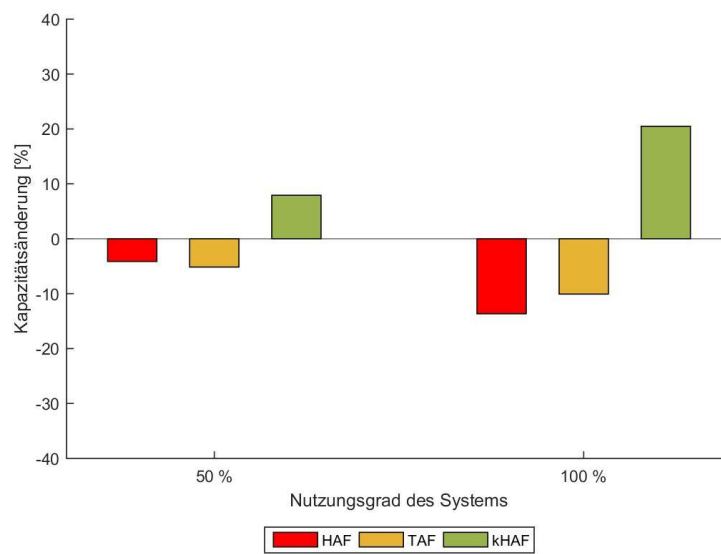
## A1-2

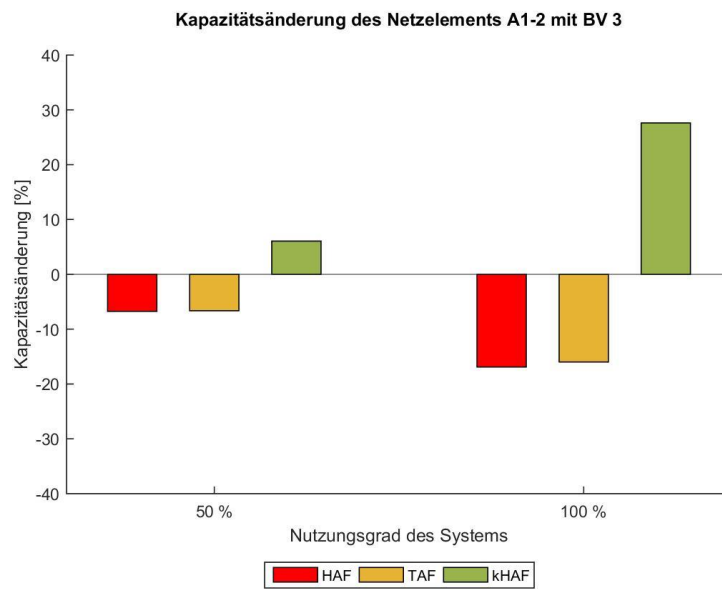
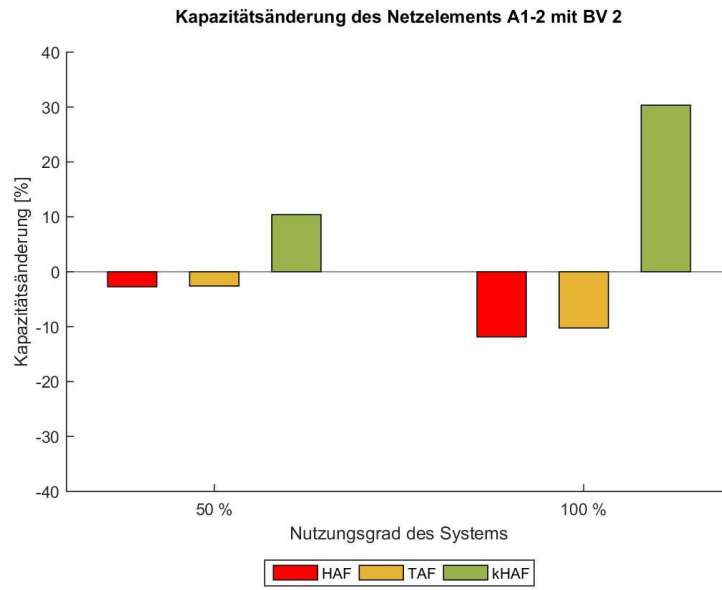


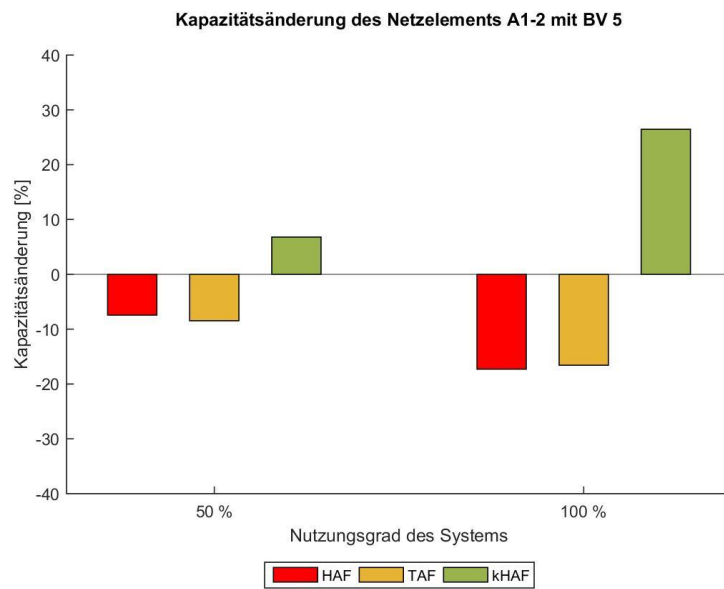
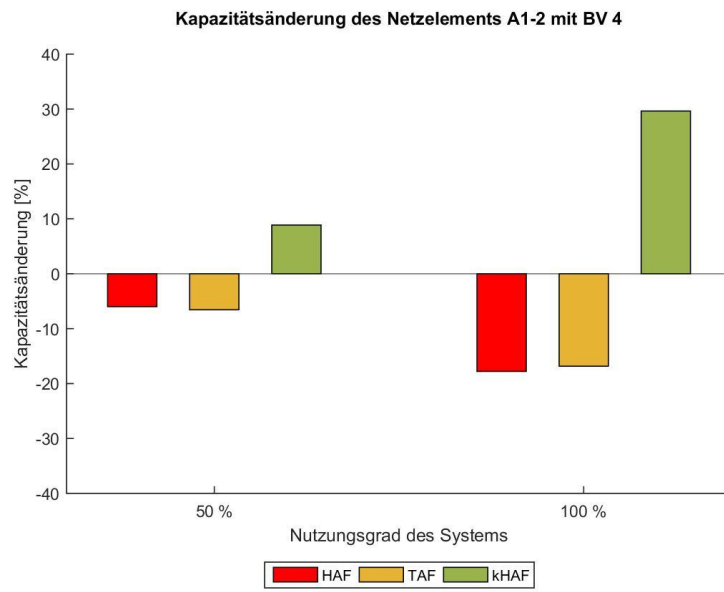
Tabelle 29 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A1-2

A1-2 Kapazitäten [Pkw-E/h] Szenarien	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
100 % Normalfahrer	3700	3771	4071	4074	4128	4095
50 % Normalfahrer - 50 % HAF	3547	3668	3796	3830	3821	3840
100 % HAF	3195	3324	3383	3350	3414	3323
50 % Normalfahrer - 50 % TAF	3509	3673	3801	3807	3779	3816
100 % TAF	3327	3385	3420	3388	3444	3450
50 % Normalfahrer - 50 % kHAF	3993	4163	4318	4435	4409	4422
100 % kHAF	4458	4915	5195	5281	5220	5216

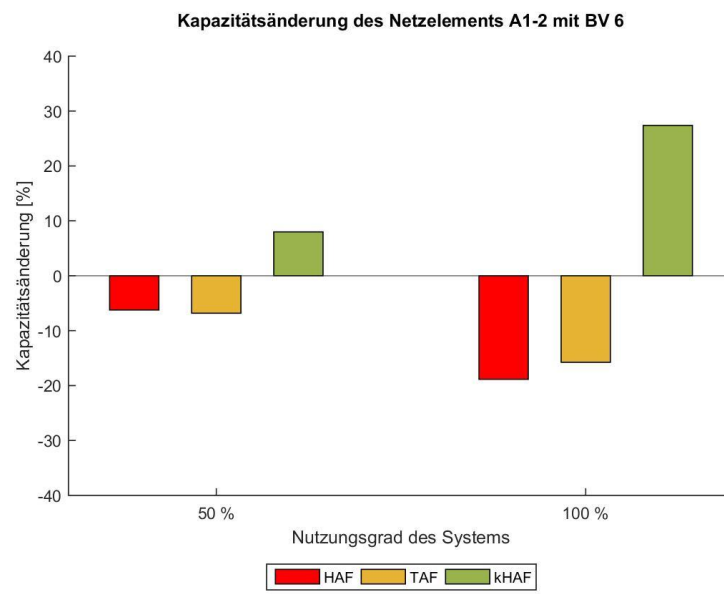
Kapazitätsänderung des Netzelements A1-2 mit BV 1











## A2-3

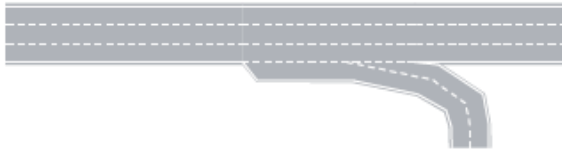
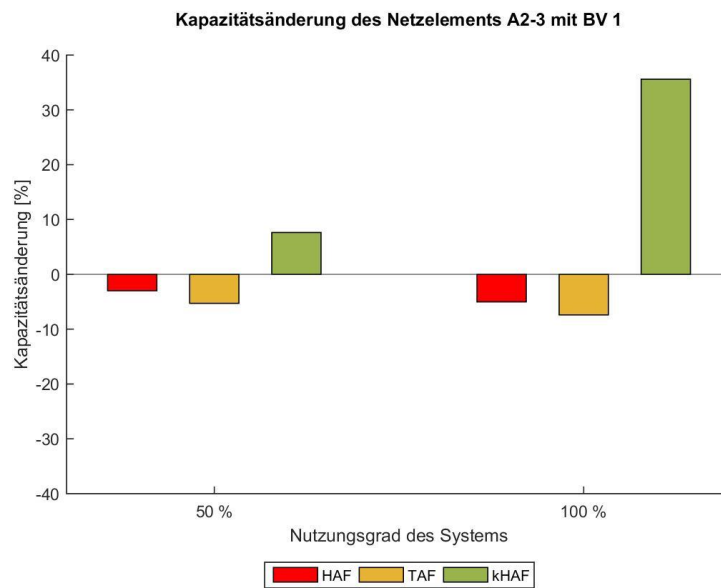
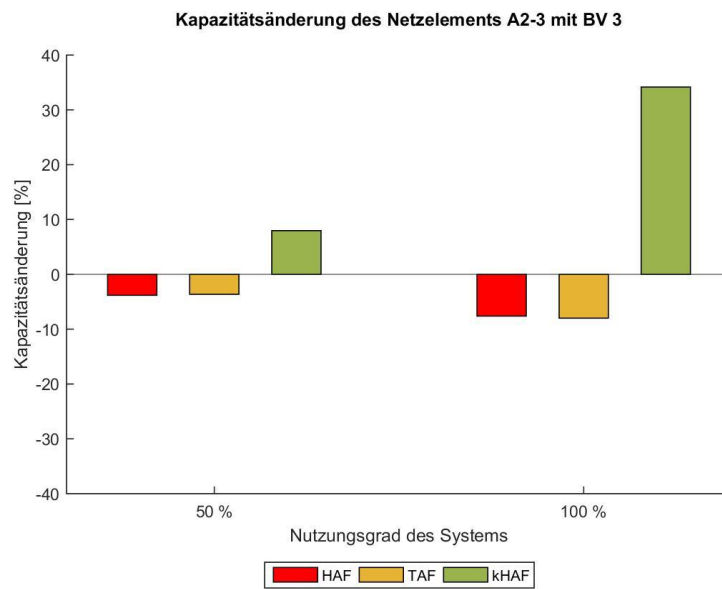
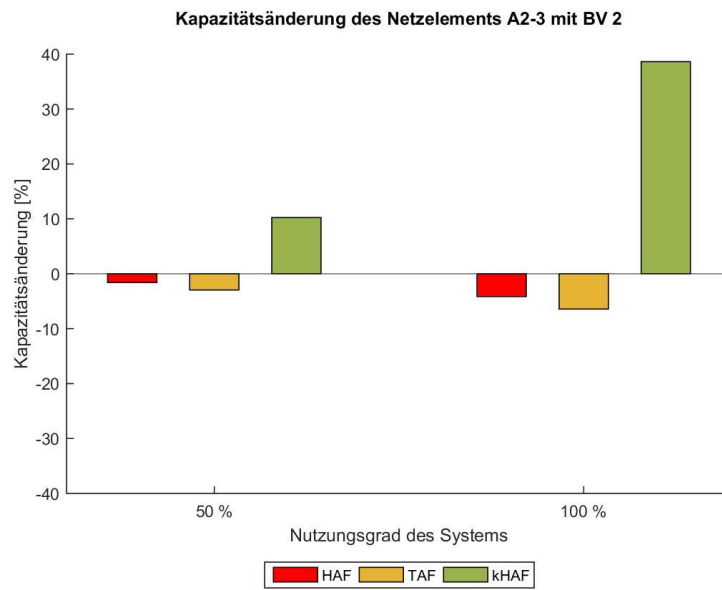
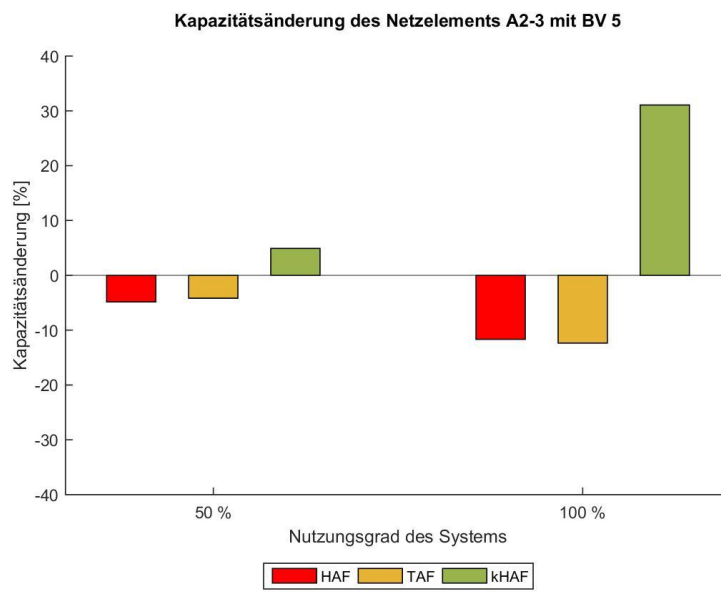
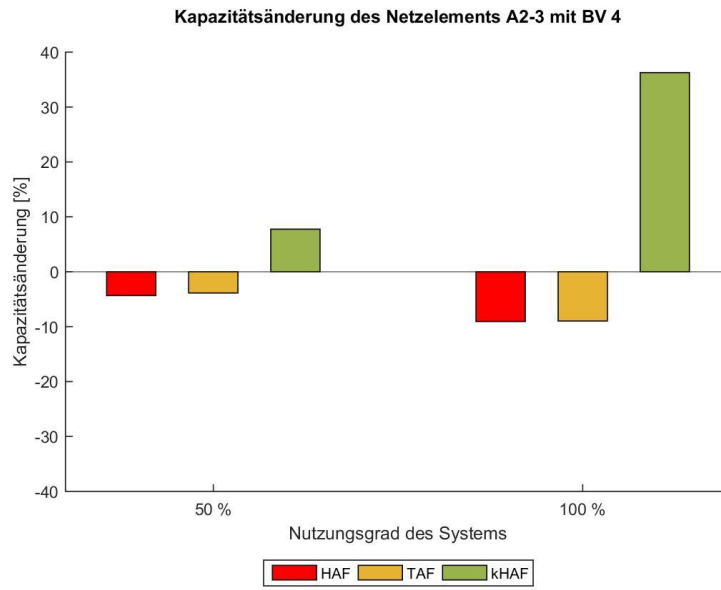


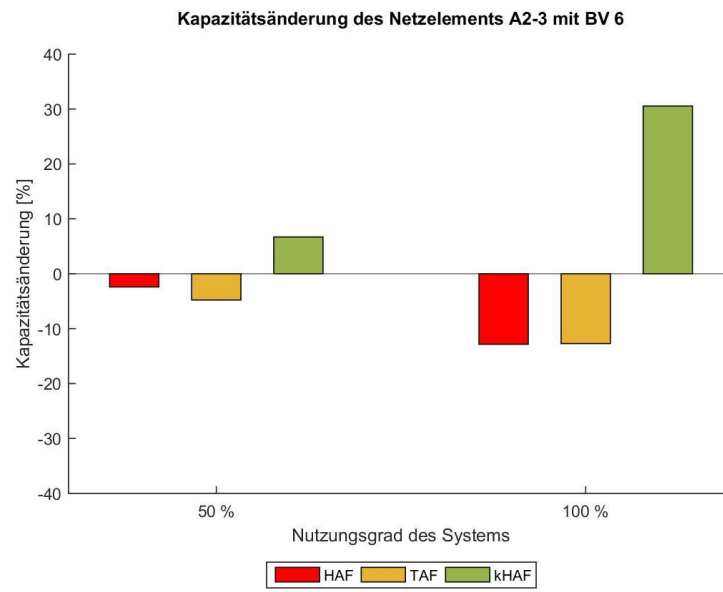
Tabelle 30 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A2-3

A2-3 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
Szenarien	1	2	3	4	5	6
100 % Normalfahrer	4822	5047	5445	5613	5828	5865
50 % Normalfahrer - 50 % HAF	4678	4966	5237	5369	5546	5724
100 % HAF	4580	4838	5030	5104	5148	5112
50 % Normalfahrer - 50 % TAF	4567	4898	5247	5396	5585	5585
100% TAF	4465	4723	5010	5110	5108	5119
50 % Normalfahrer - 50 % kHAF	5190	5564	5879	6049	6114	6258
100 % kHAF	6538	6996	7305	7648	7639	7656









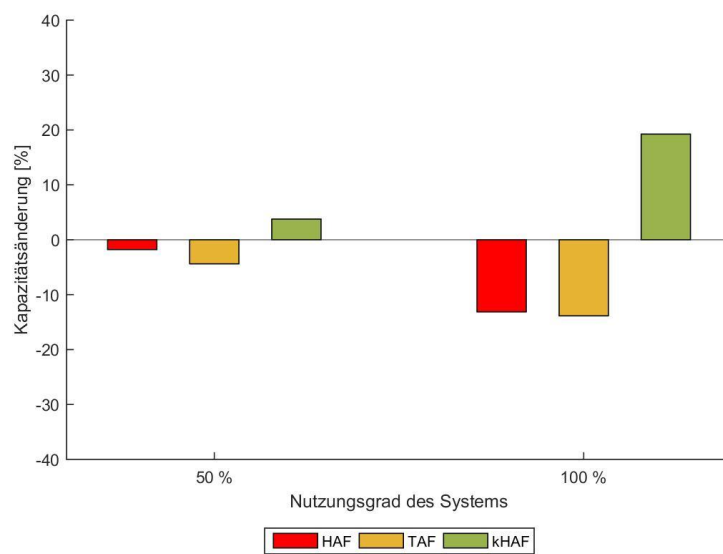
## A4-2

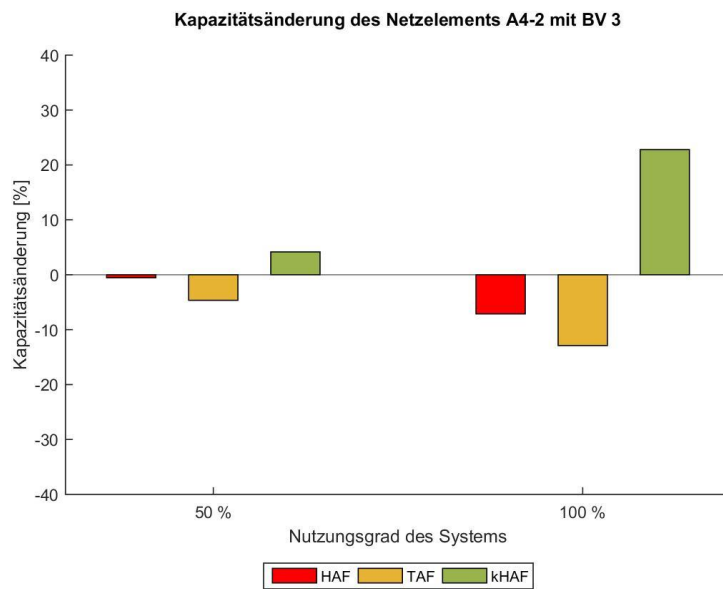
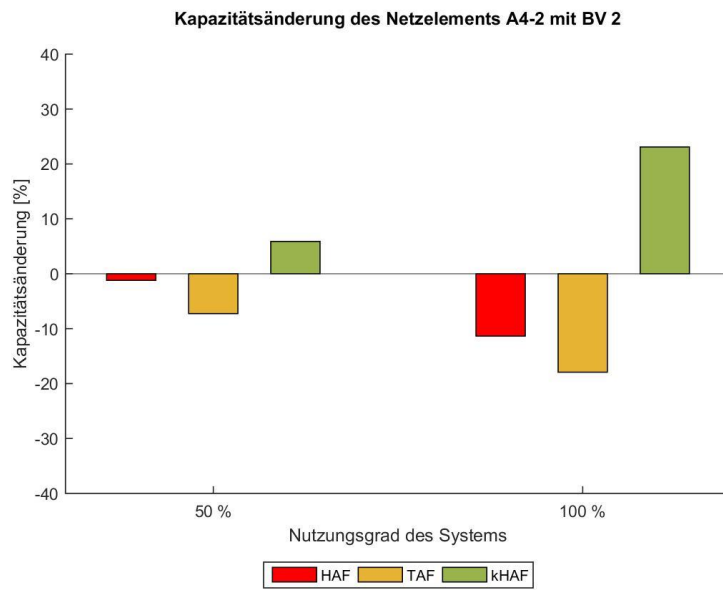


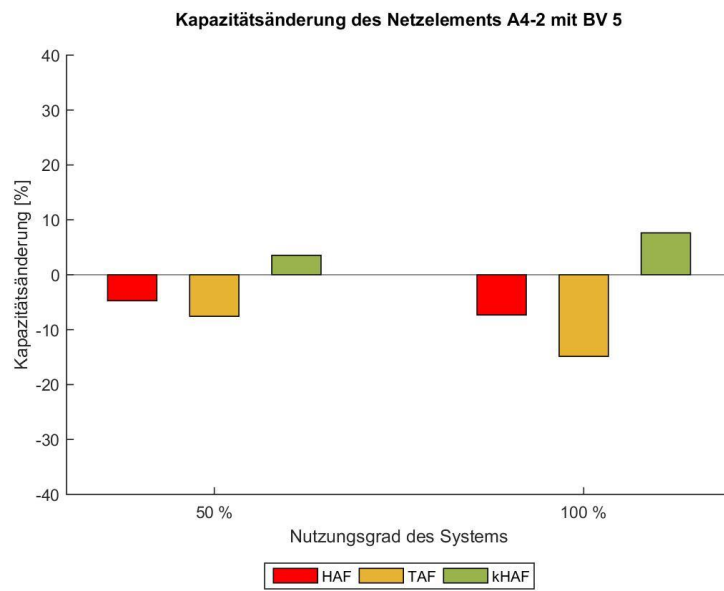
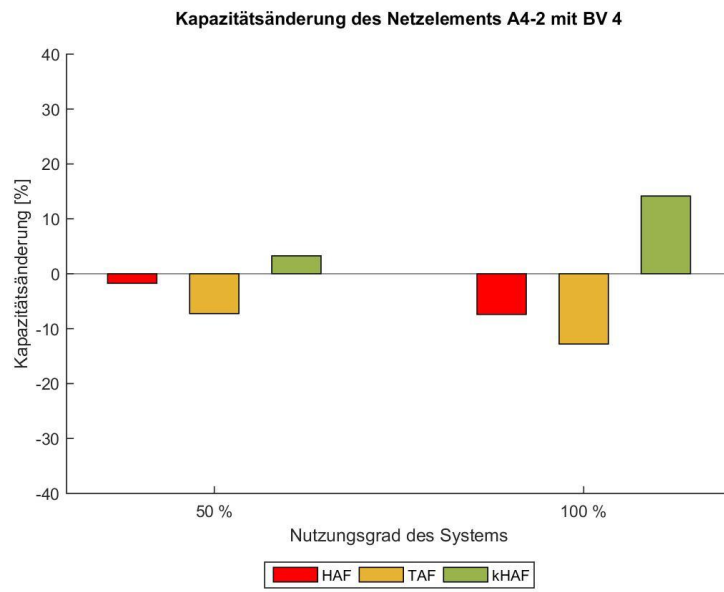
Tabelle 31 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A4-2

A4-2 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	4988	5112	4803	4649	4483	4128
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	4899	5051	4777	4568	4271	3919
<b>100 % HAF</b>	4333	4532	4461	4305	4155	3822
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	4769	4741	4580	4312	4144	3865
<b>100 % TAF</b>	4297	4196	4184	4054	3817	3563
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	5176	5413	5003	4801	4642	4091
<b>100 % kHAF</b>	5948	6292	5898	5307	4825	4376

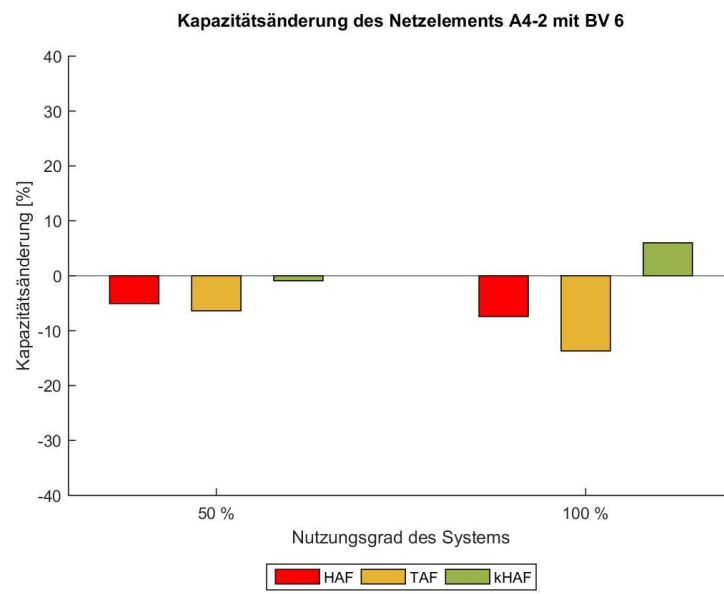
Kapazitätsänderung des Netzelements A4-2 mit BV 1











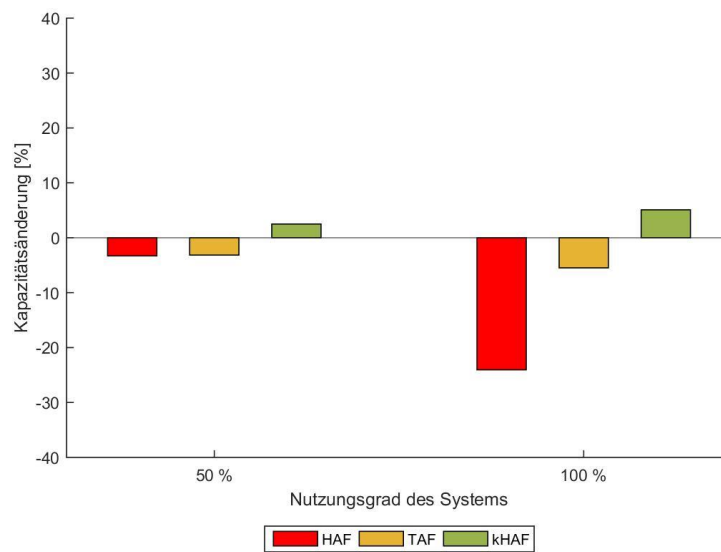
## VR1-1

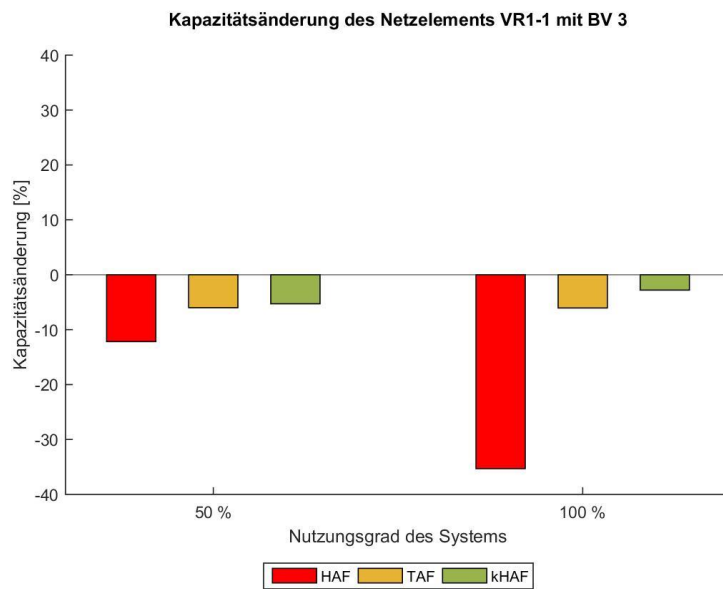
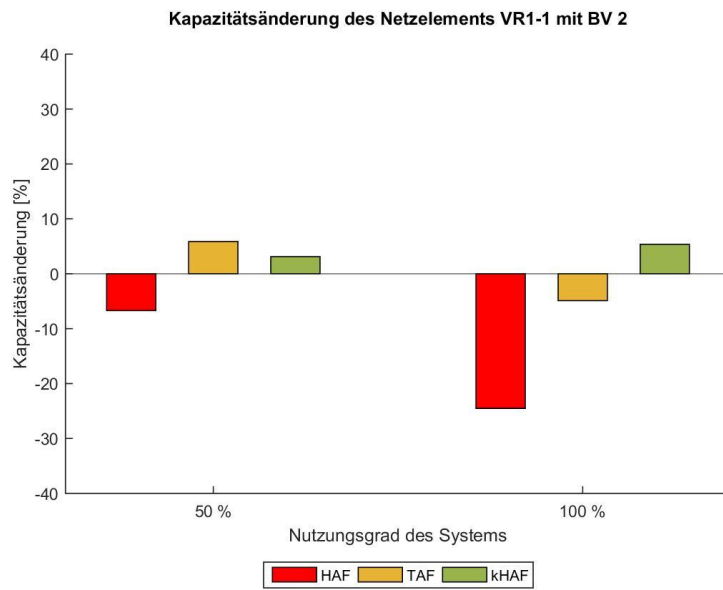


Tabelle 32 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement VR1-1

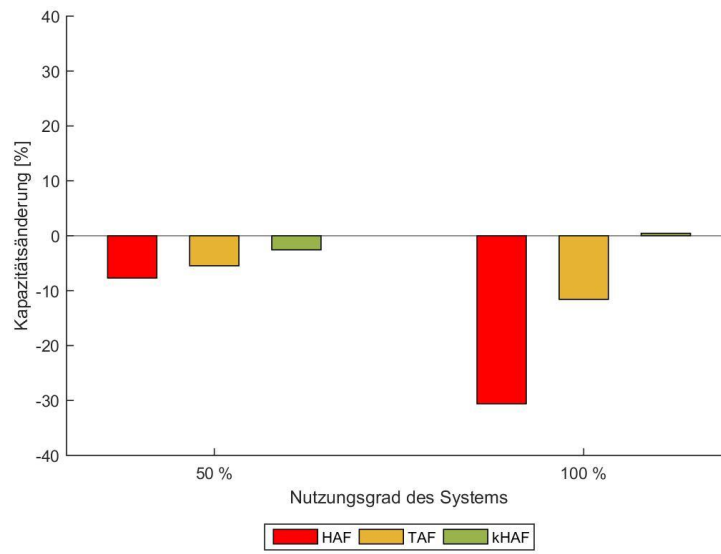
VR1-1 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	2279	2370	2513	2415	2114	2017
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	2204	2211	2207	2229	2188	2015
<b>100 % HAF</b>	1731	1789	1626	1676	1759	1745
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	2207	2509	2362	2283	2002	2044
<b>100% TAF</b>	2154	2254	2361	2135	2207	2041
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	2336	2444	2380	2353	2152	2146
<b>100 % kHAF</b>	2395	2497	2443	2426	2295	2426

Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 1

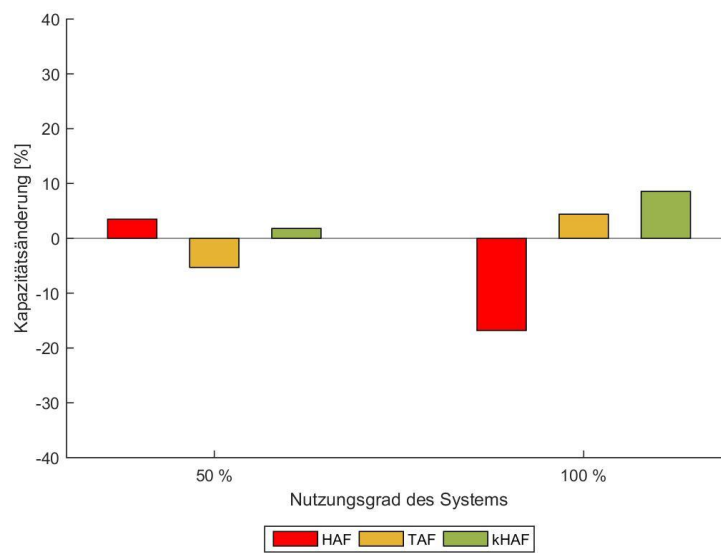


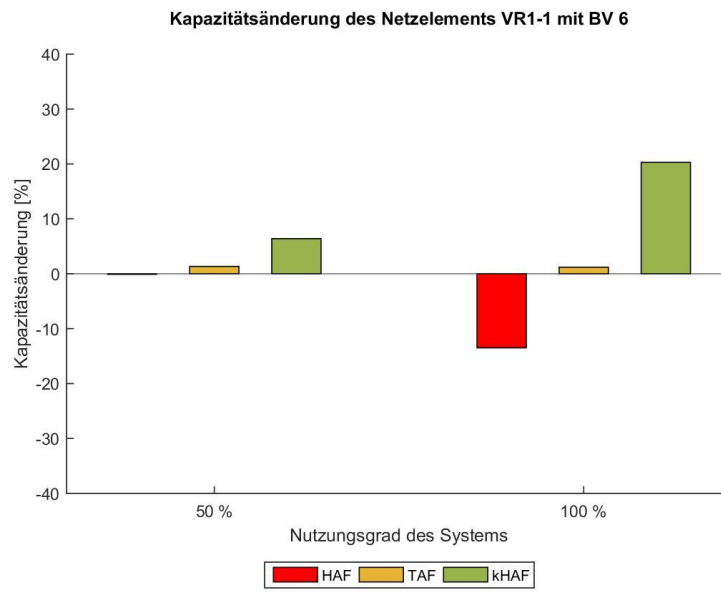


Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 4

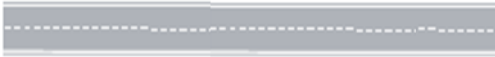


Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 5



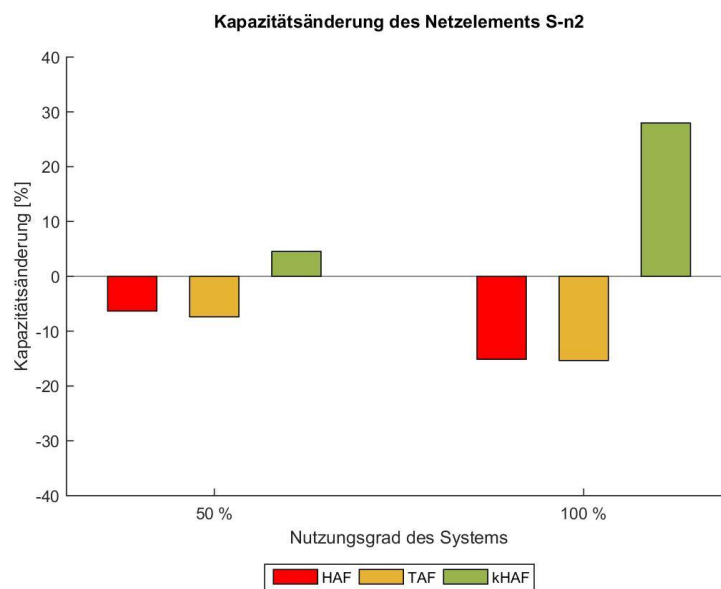


## 2 Fahrstreifen



**Tabelle 33** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n2

S-n2	Kapazität [Pkw-E/h]
<b>Szenarien</b>	
<b>100 % Normalfahrer</b>	4073
<b>50 % Normalfahrer - 50 % HAF</b>	3815
<b>100 % HAF</b>	3457
<b>50 % Normalfahrer - 50 % TAF</b>	3772
<b>100% TAF</b>	3448
<b>50 % Normalfahrer - 50 % kHAF</b>	4258
<b>100 % kHAF</b>	5212

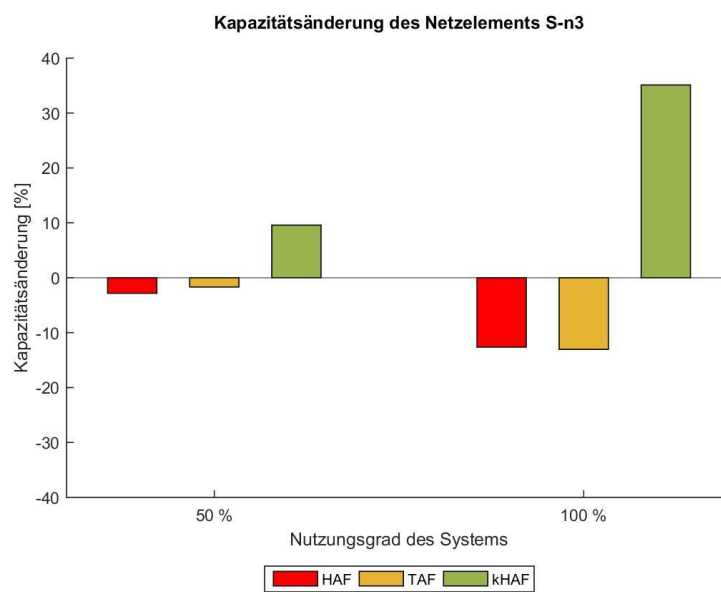


### 3 Fahrstreifen



**Tabelle 34** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n3

S-n3	Kapazität [Pkw-E/h]
Szenarien	
100 % Normalfahrer	5910
50 % Normalfahrer - 50 % HAF	5743
100 % HAF	5164
50 % Normalfahrer - 50 % TAF	5810
100% TAF	5139
50 % Normalfahrer - 50 % kHAF	6476
100 % kHAF	7985



## 13 Anhang II

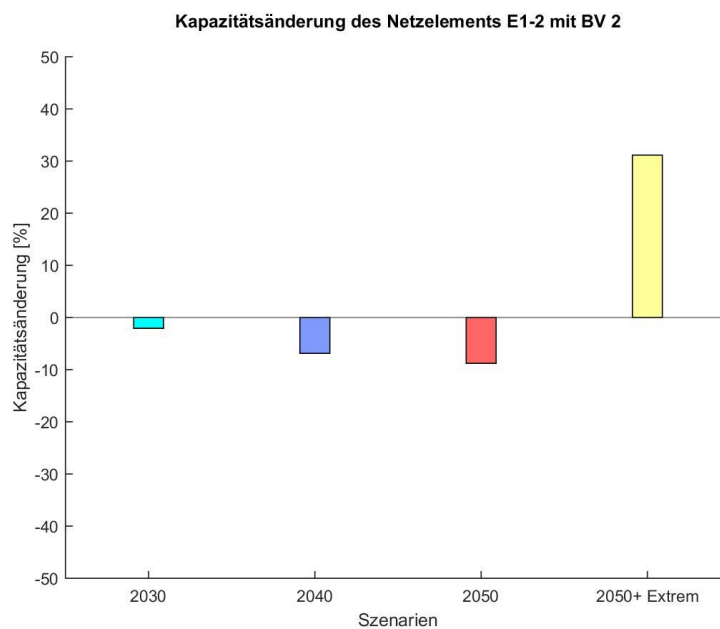
Im Folgenden sind alle Einzelergebnisse für die simulierten Untersuchungsszenarien 2030, 2040 und 2050 (jeweils mit den geschätzten Nutzungsgraden der Systeme für das Jahr) und „100% HAF\_Extrem“ (alle Fahrzeuge können mit besonders kleinen Abständen zueinander fahren), nach Netzelement geordnet, darstellt.

### E1-2

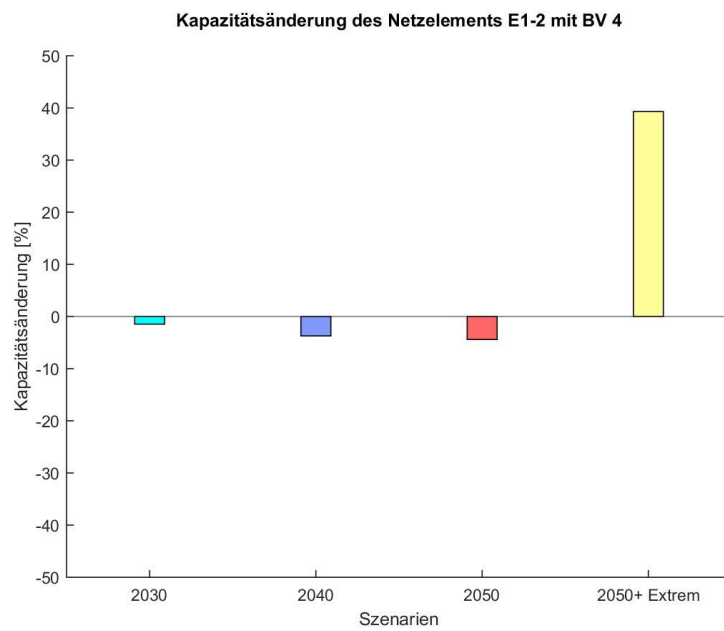
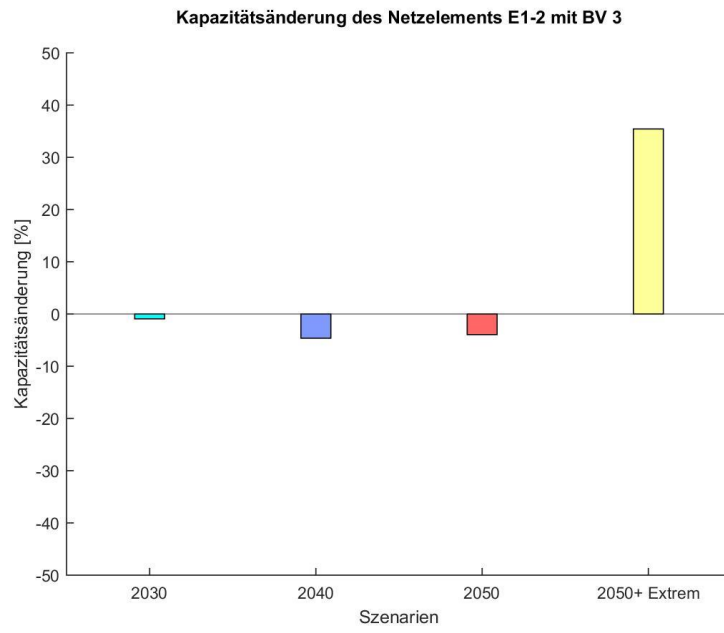


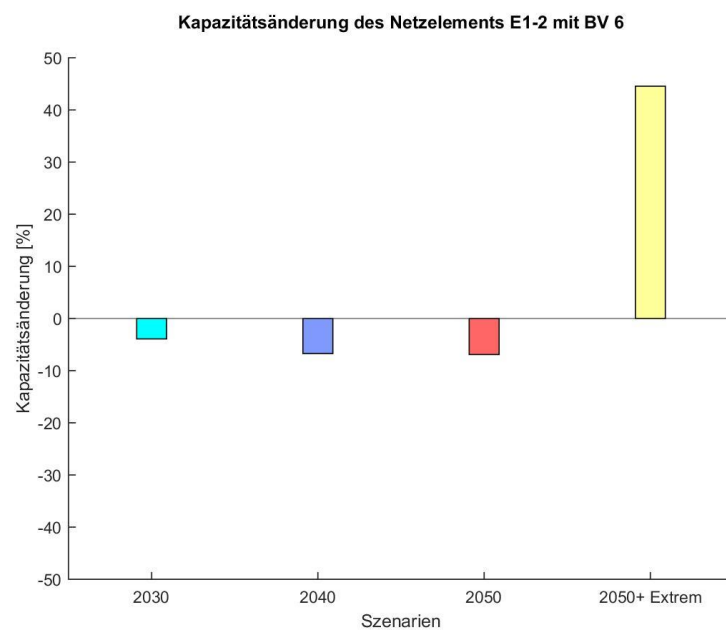
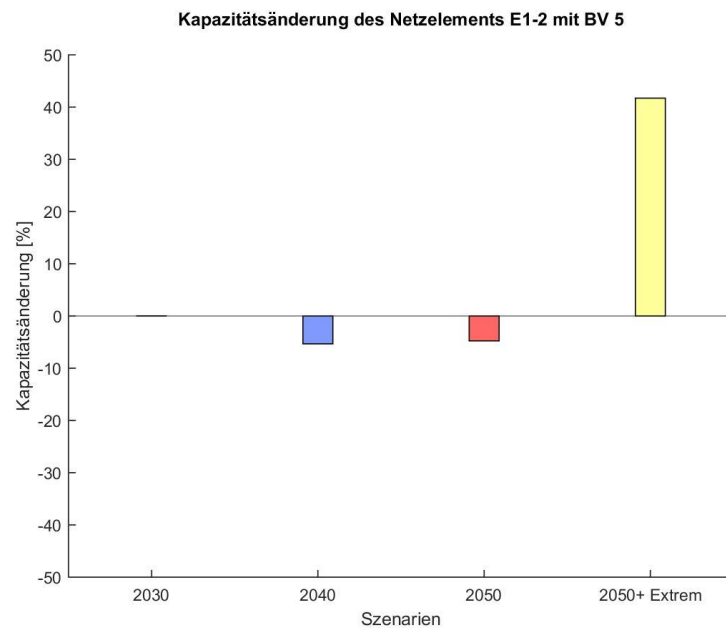
**Tabelle 35** – Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-2

E1-2 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis				
	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	3764	3848	3942	4052	4223
<b>Szenario 2030</b>	3686	3812	3884	4053	4058
<b>Szenario 2040</b>	3505	3670	3795	3836	3939
<b>Szenario 2050</b>	3433	3696	3768	3859	3931
<b>Szenario 2050+ Extrem</b>	4936	5211	5491	5742	6104







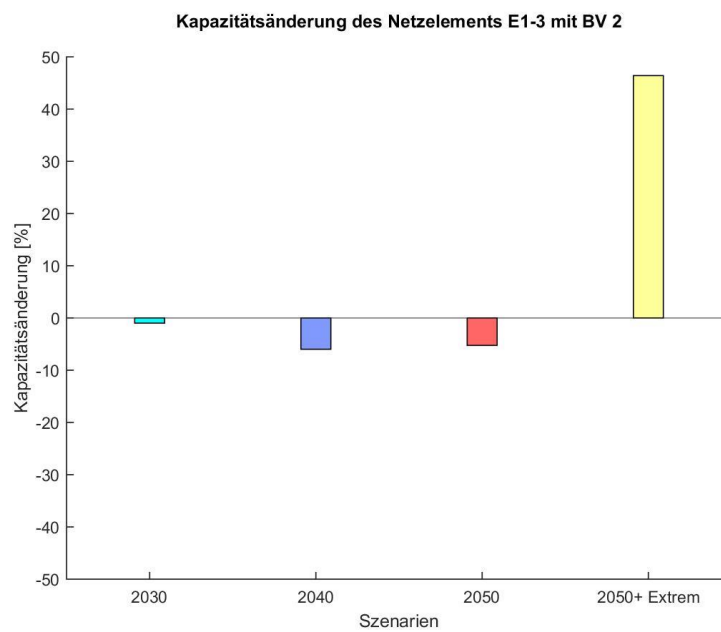


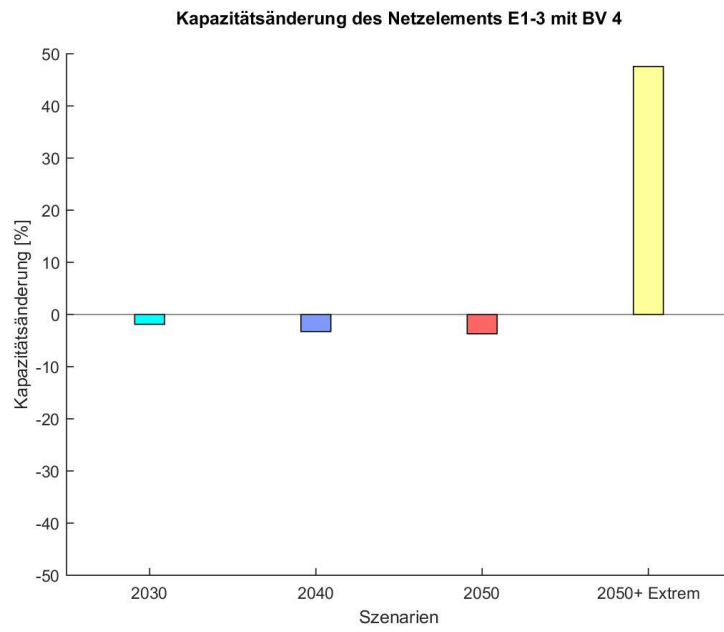
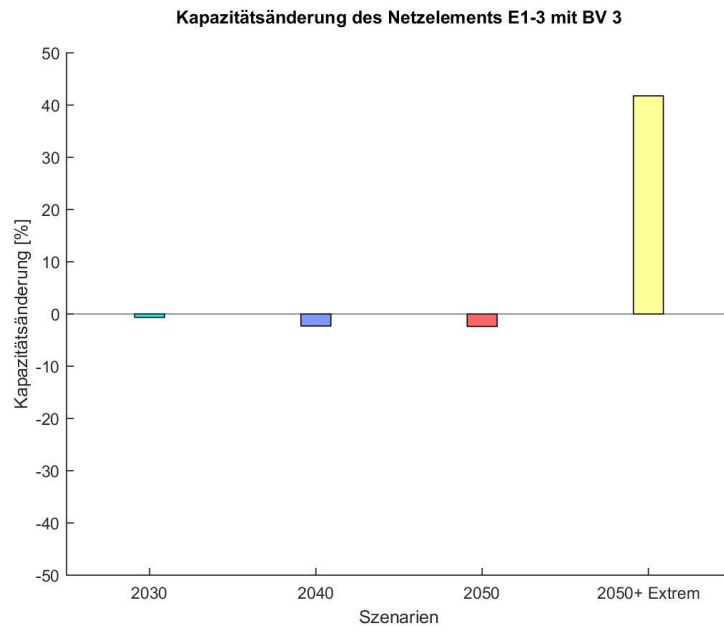
## E1-3

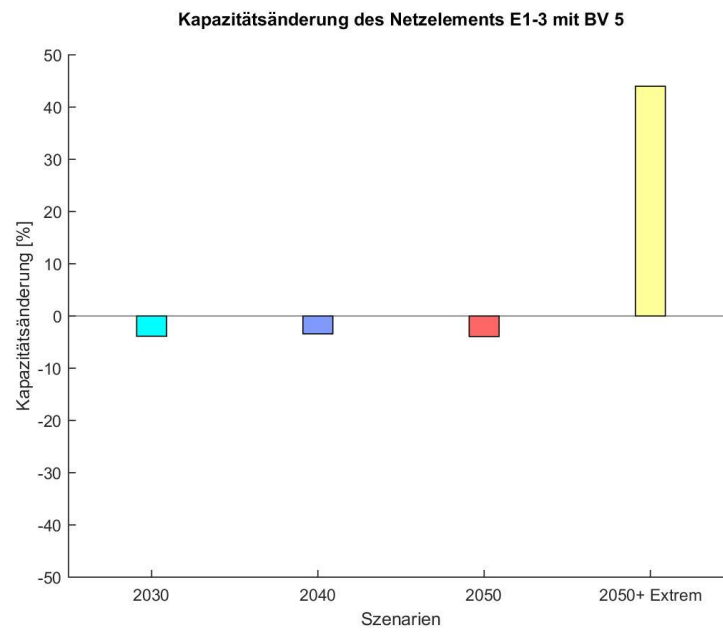


Tabelle 36 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-3

E1-3 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis			
	2	3	4	5
<b>Szenarien</b>				
<b>100 % Normalfahrer</b>	5650	5778	5861	6070
<b>Szenario 2030</b>	5594	5741	5751	5835
<b>Szenario 2040</b>	5312	5645	5670	5863
<b>Szenario 2050</b>	5353	5640	5645	5831
<b>Szenario 2050+ Extrem</b>	8271	8191	8648	8740





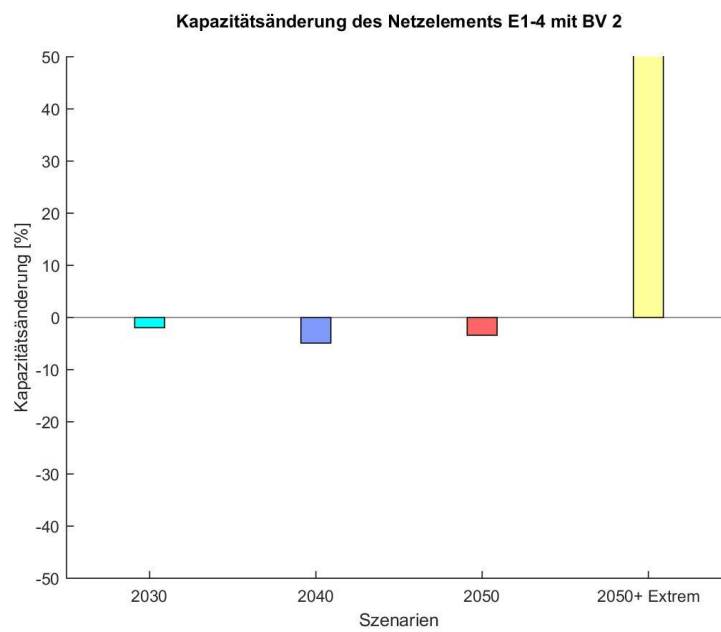


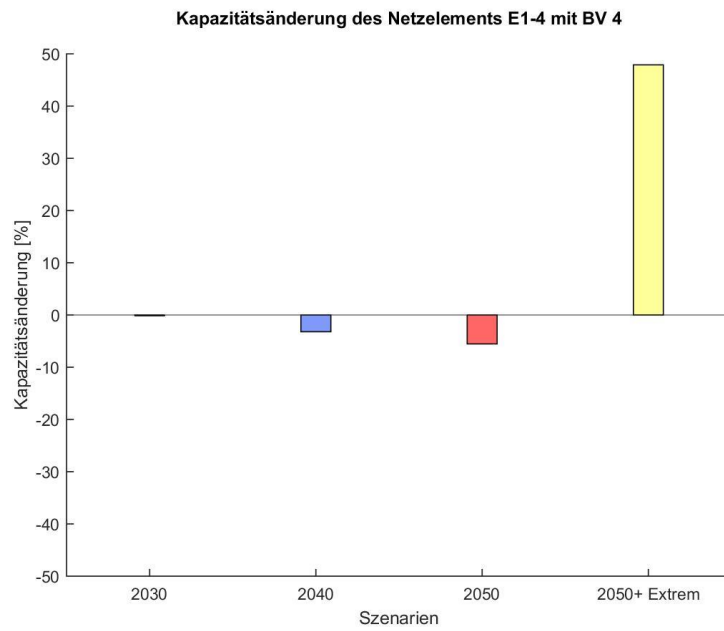
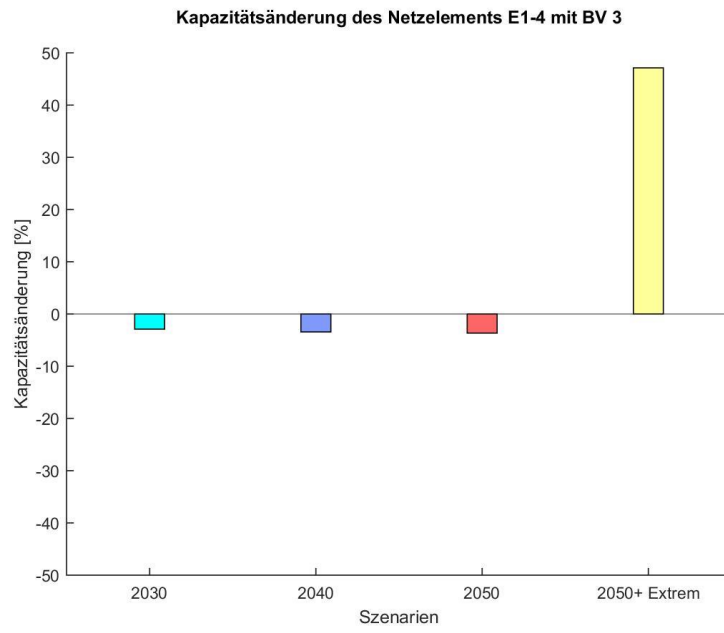
## E1-4

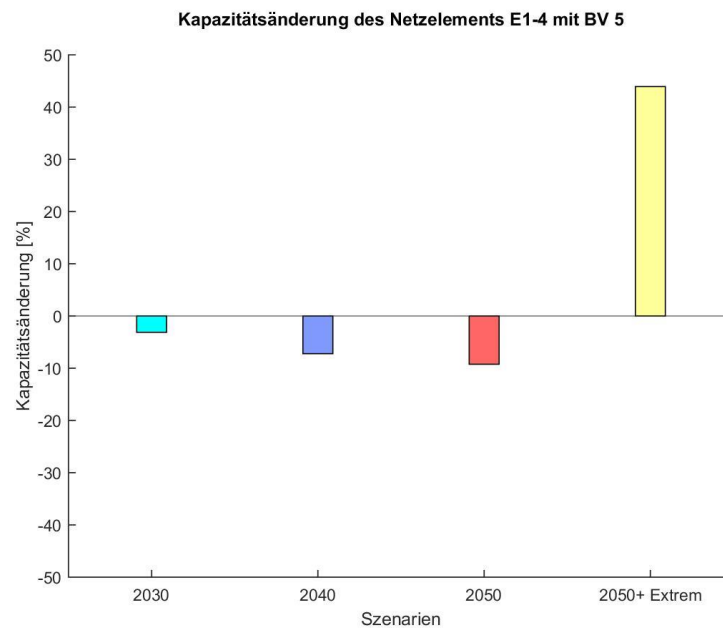


Tabelle 37 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement E1-4

E1-4 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis			
Szenarien	2	3	4	5
100 % Normalfahrer	7544	7736	7807	8141
Szenario 2030	7396	7511	7796	7887
Szenario 2040	7174	7471	7556	7553
Szenario 2050	7288	7453	7374	7389
Szenario 2050+ Extrem	11376	11381	11546	11716









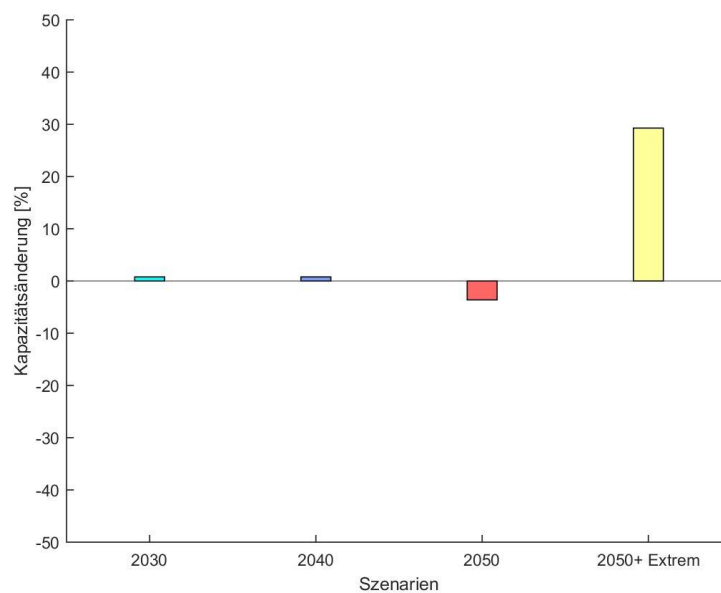
## A1-2

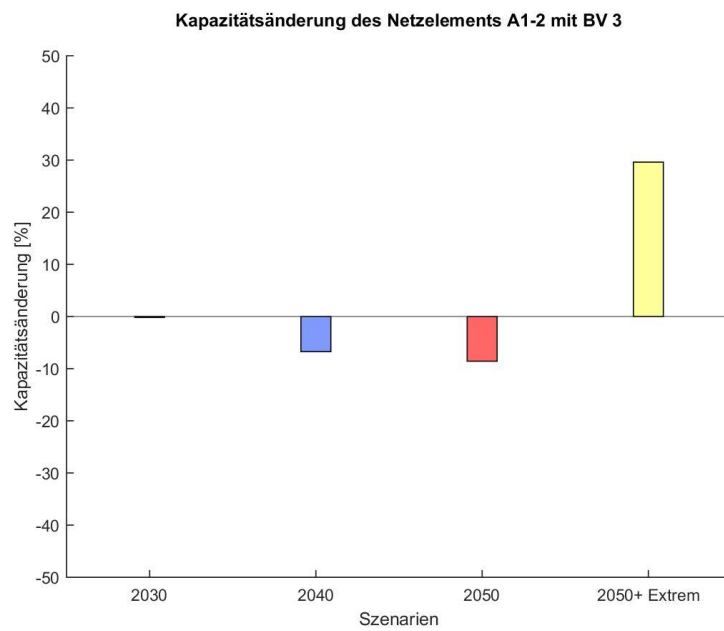
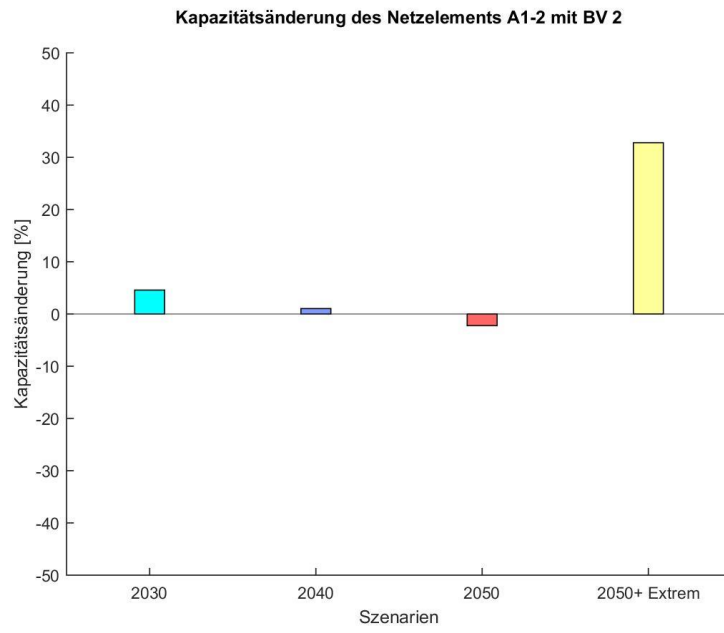


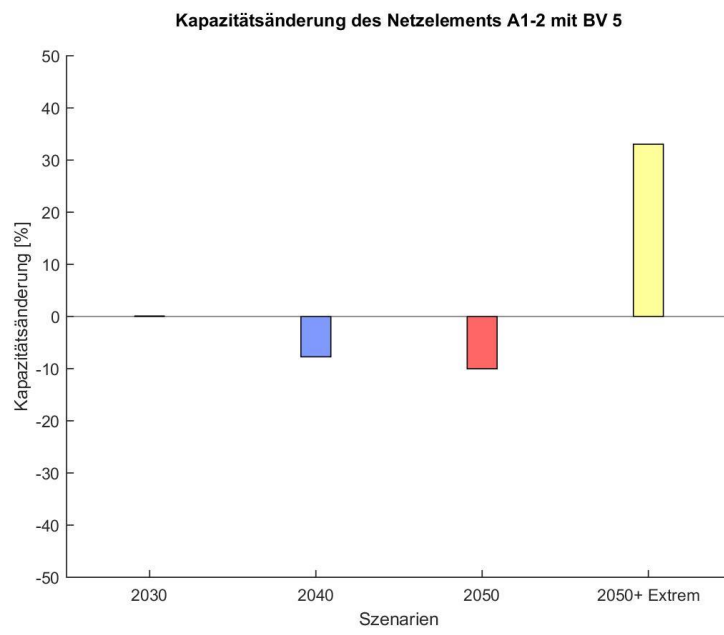
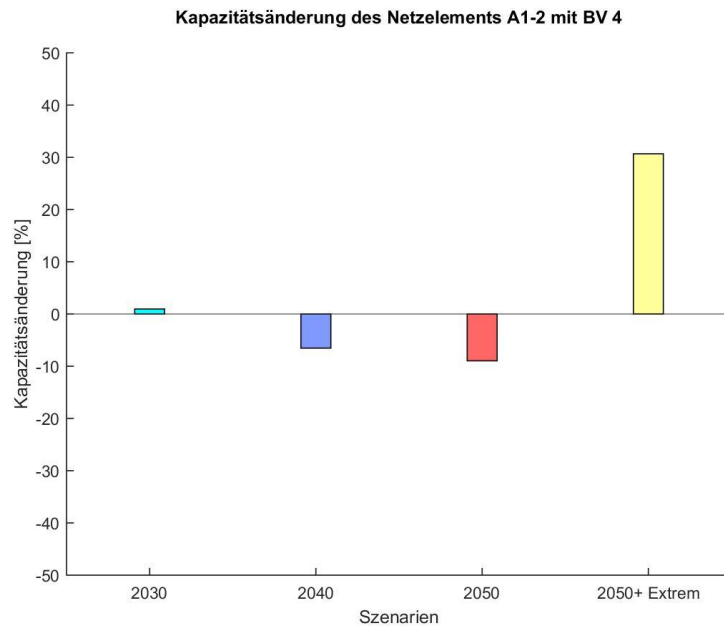
Tabelle 38 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A1-2

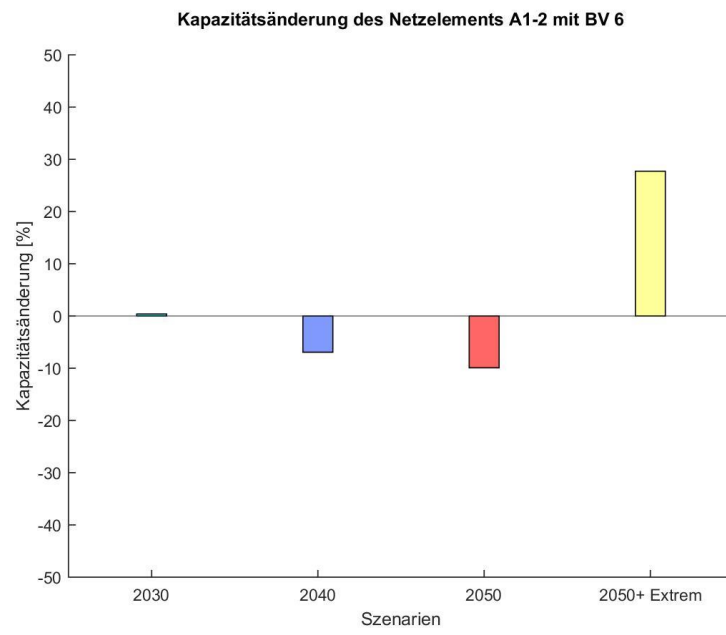
A1-2 Kapazitäten [Pkw-E/h] Szenarien	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
100 % Normalfahrer	3700	3771	4071	4074	4128	4095
Szenario 2030	3729	3944	4064	4113	4132	4111
Szenario 2040	3729	3810	3797	3808	3809	3811
Szenario 2050	3566	3687	3722	3709	3714	3689
Szenario 2050+ Extrem	4783	5007	5276	5323	5492	5230

Kapazitätsänderung des Netzelements A1-2 mit BV 1









## A2-3

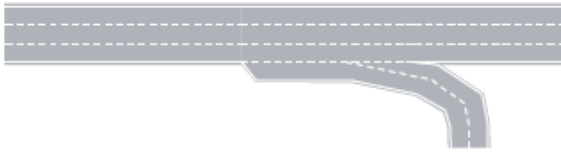
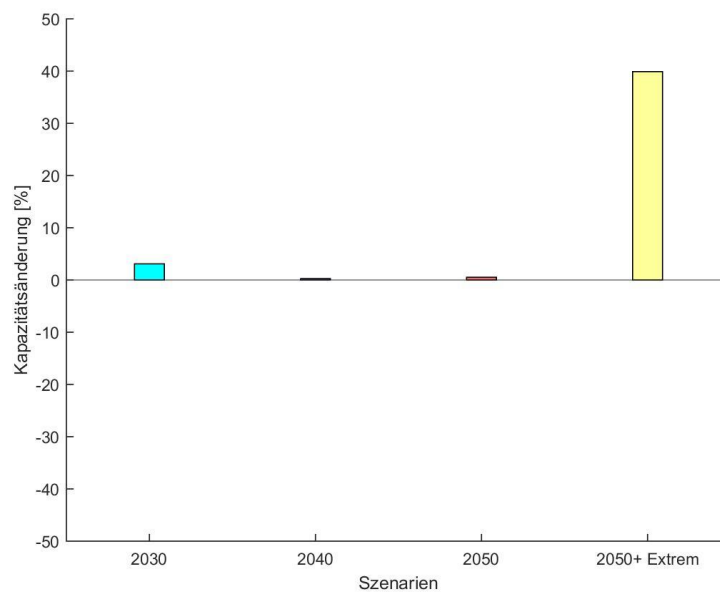
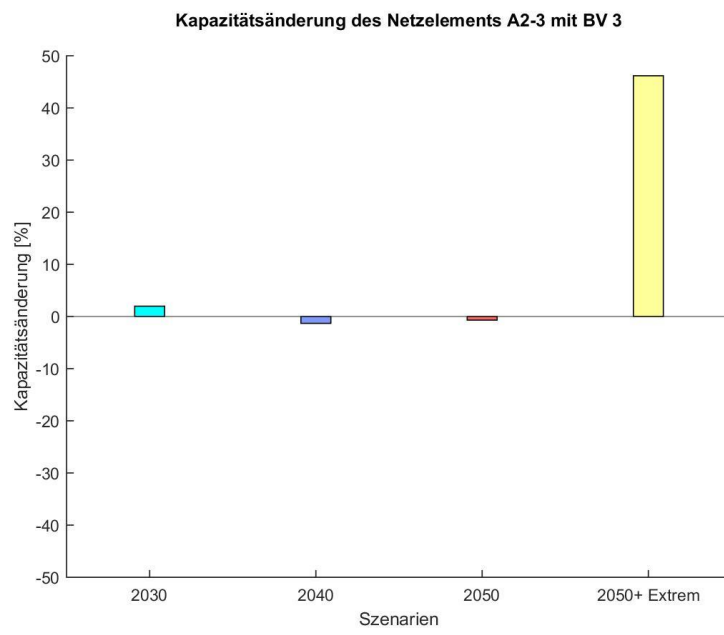
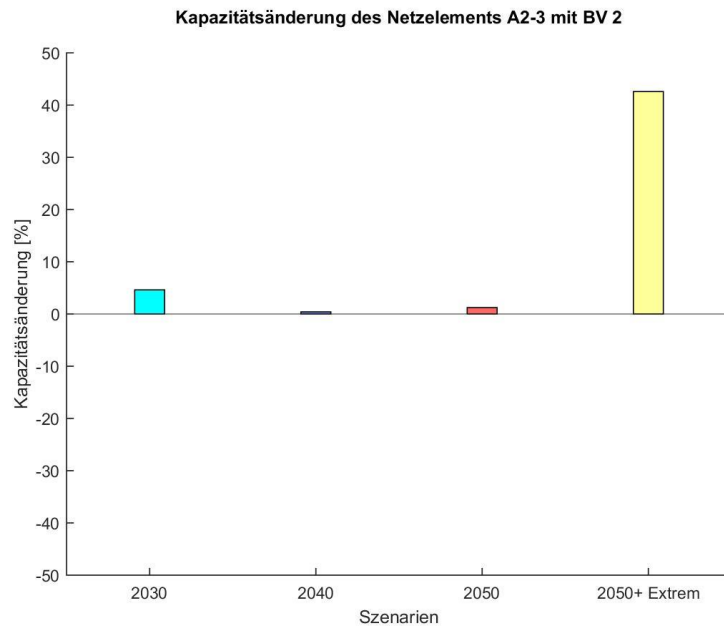


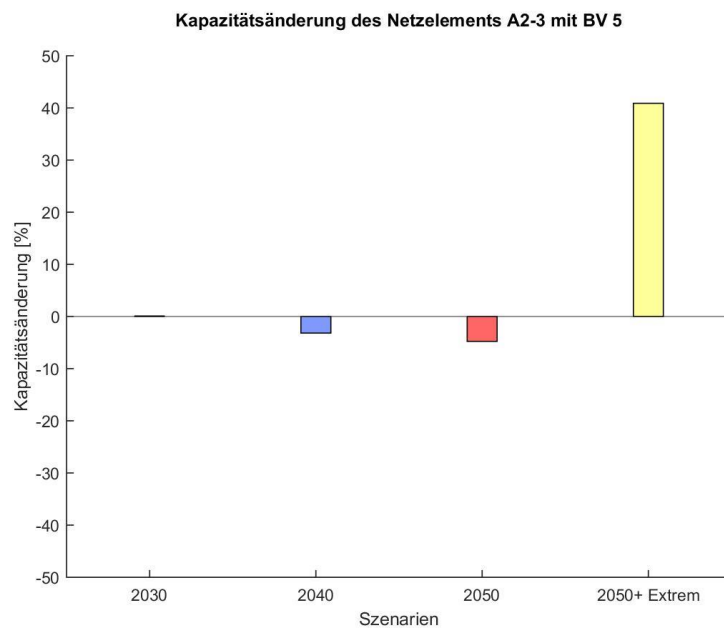
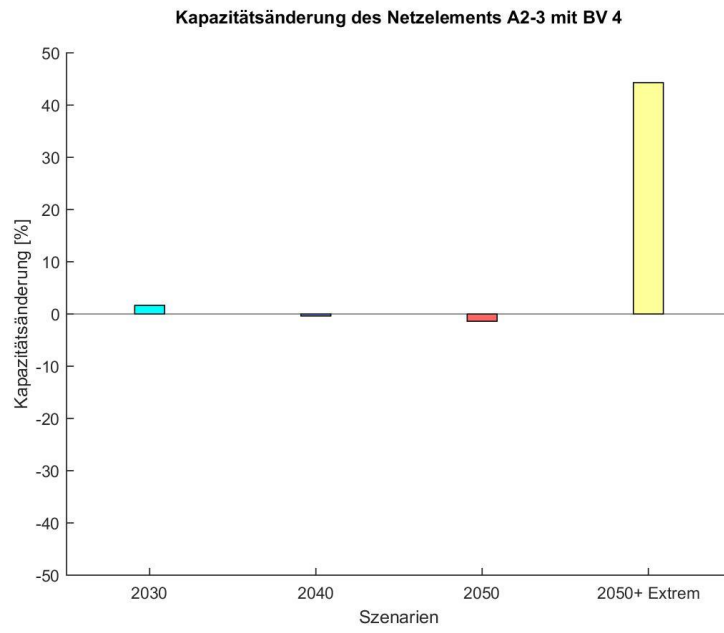
Tabelle 39 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A2-3

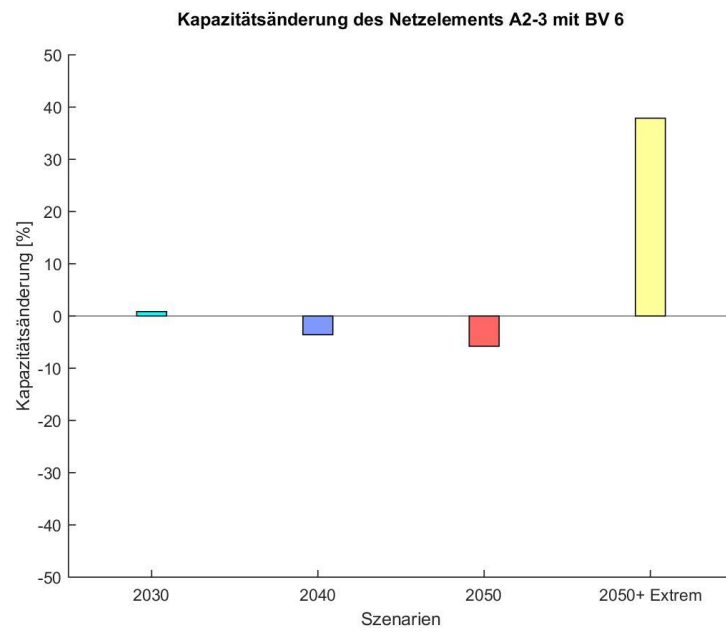
A2-3 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	4822	5047	5445	5613	5828	5865
<b>Szenario 2030</b>	4971	5280	5553	5706	5833	5915
<b>Szenario 2040</b>	4835	5067	5374	5591	5643	5655
<b>Szenario 2050</b>	4847	5109	5407	5535	5550	5525
<b>Szenario 2050+ Extrem</b>	6745	7196	7958	8099	8211	8086

Kapazitätsänderung des Netzelements A2-3 mit BV 1











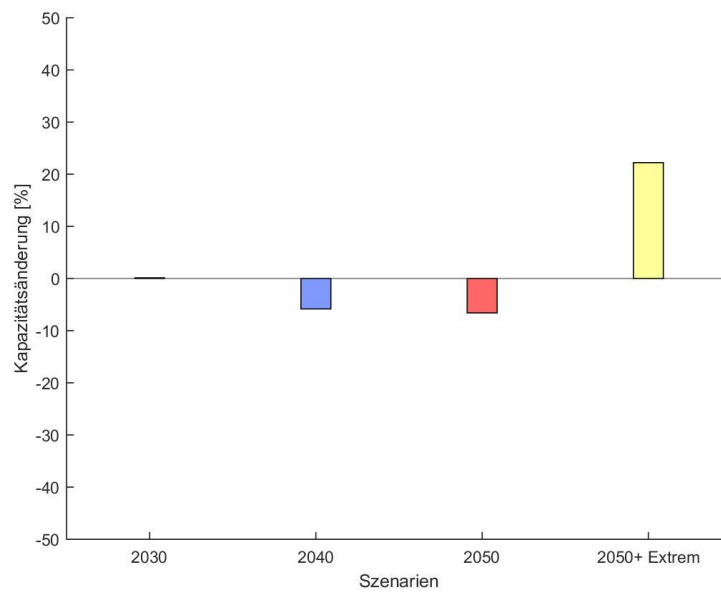
## A4-2

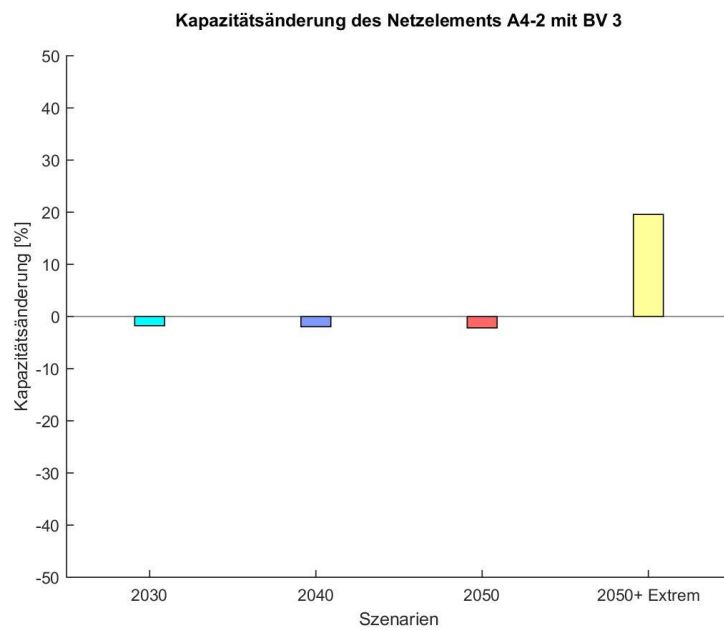
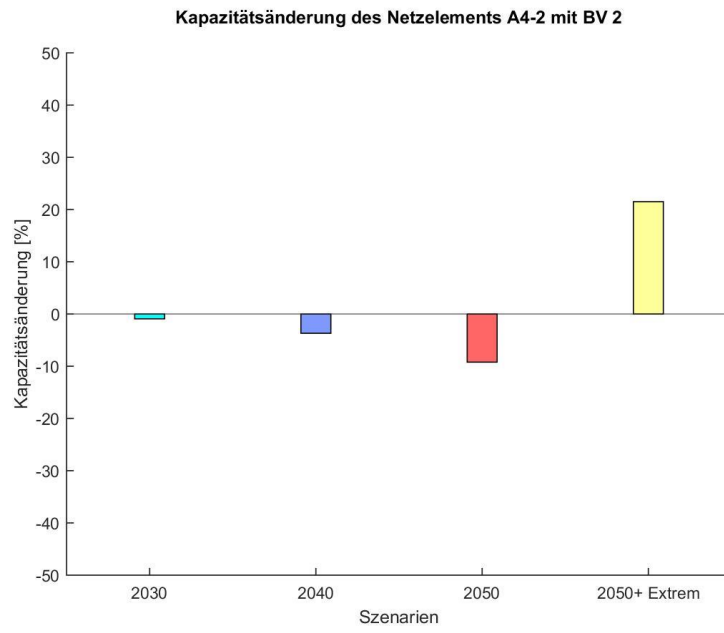


Tabelle 40 - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement A4-2

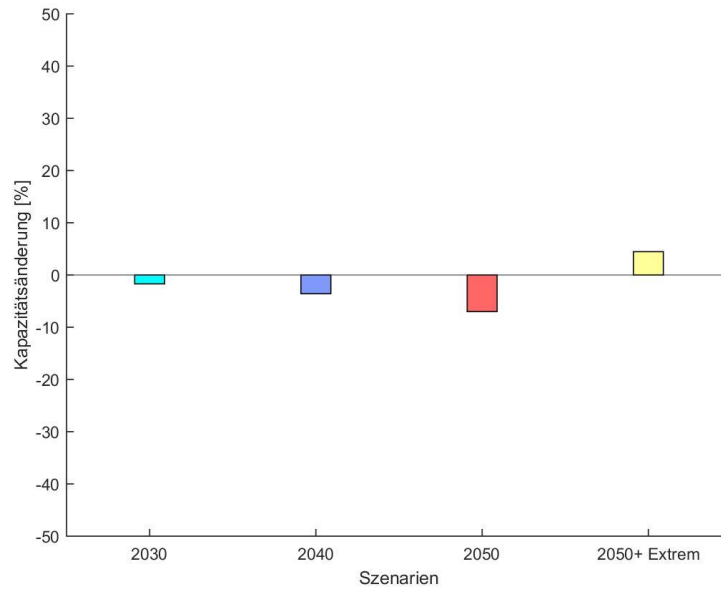
A4-2 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	4988	5112	4803	4649	4483	4128
<b>Szenario 2030</b>	4994	5064	4719	4570	4280	3998
<b>Szenario 2040</b>	4697	4923	4709	4482	4104	3855
<b>Szenario 2050</b>	4659	4641	4698	4323	4097	3893
<b>Szenario 2050+ Extrem</b>	6096	6211	5743	4856	4366	3877

Kapazitätsänderung des Netzelements A4-2 mit BV 1

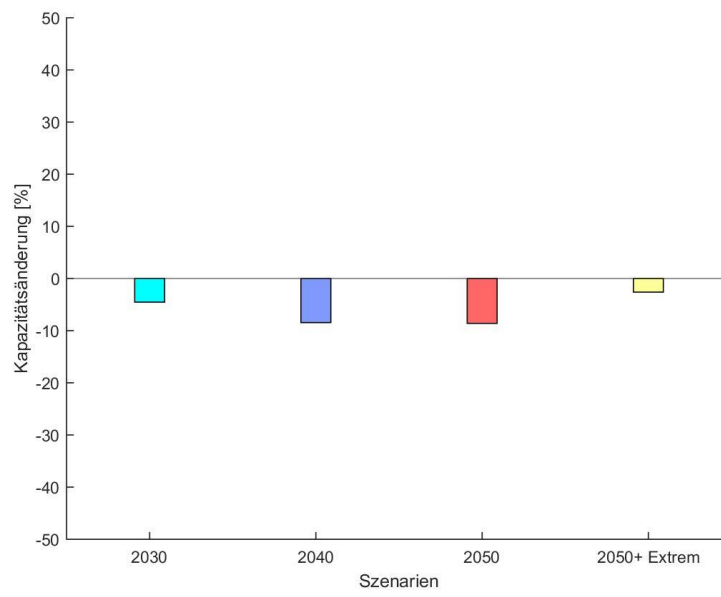


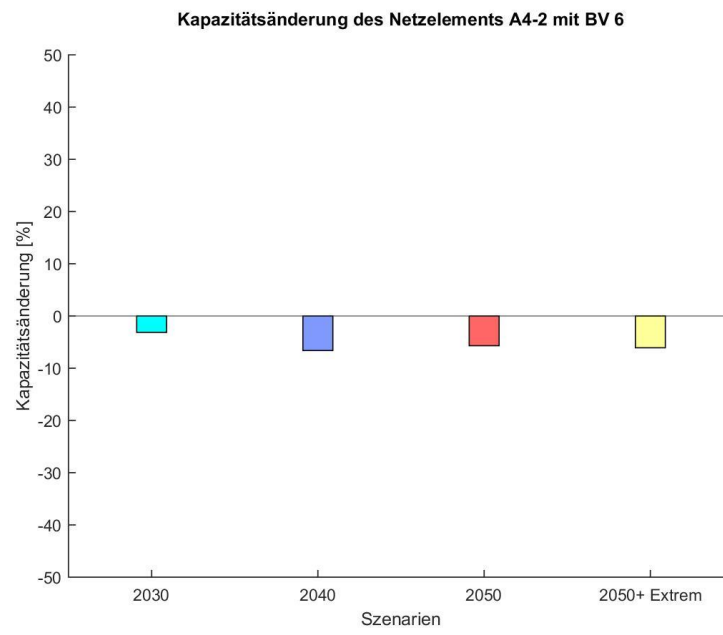


Kapazitätsänderung des Netzelements A4-2 mit BV 4



Kapazitätsänderung des Netzelements A4-2 mit BV 5





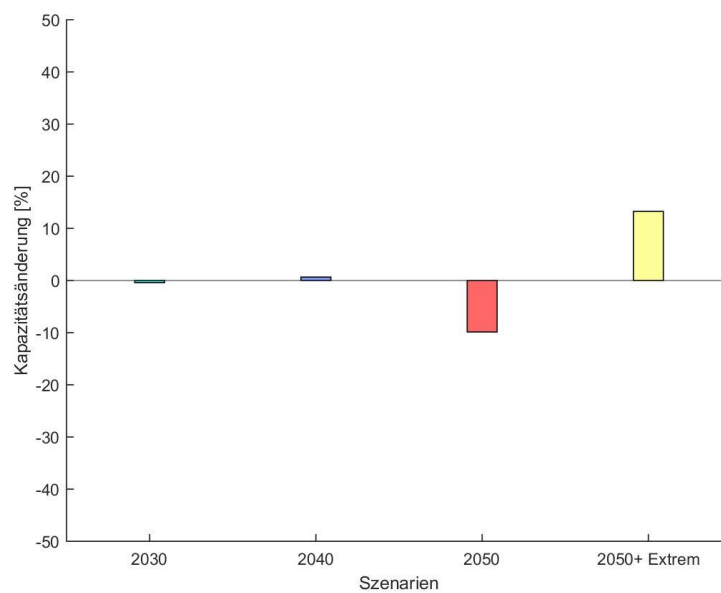
## VR1-1



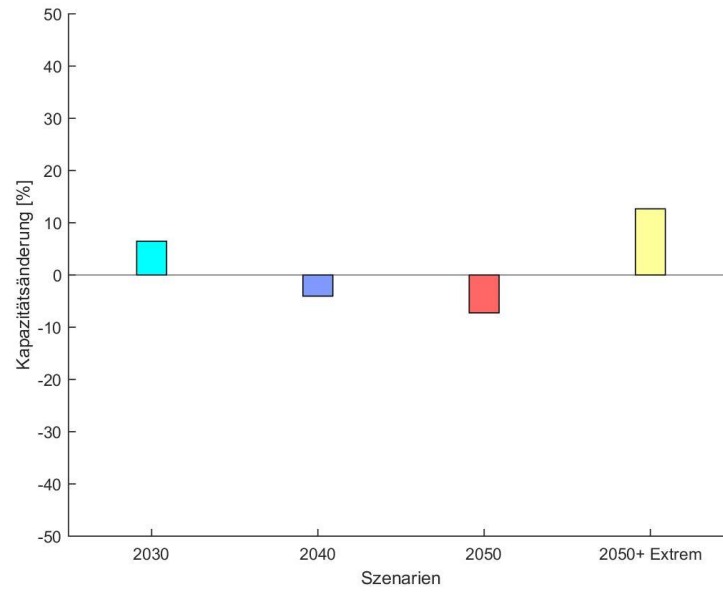
**Tabelle 41** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement VR1-1

VR1-1 Kapazitäten [Pkw-E/h]	Belastungsverhältnis					
	1	2	3	4	5	6
<b>100 % Normalfahrer</b>	2279	2370	2513	2415	2114	2017
<b>Szenario 2030</b>	2270	2523	2288	2371	2258	2030
<b>Szenario 2040</b>	2294	2274	2357	2198	2243	2016
<b>Szenario 2050</b>	2054	2198	2030	2119	1872	1988
<b>Szenario 2050+ Extrem</b>	2581	2670	2622	2475	2483	2379

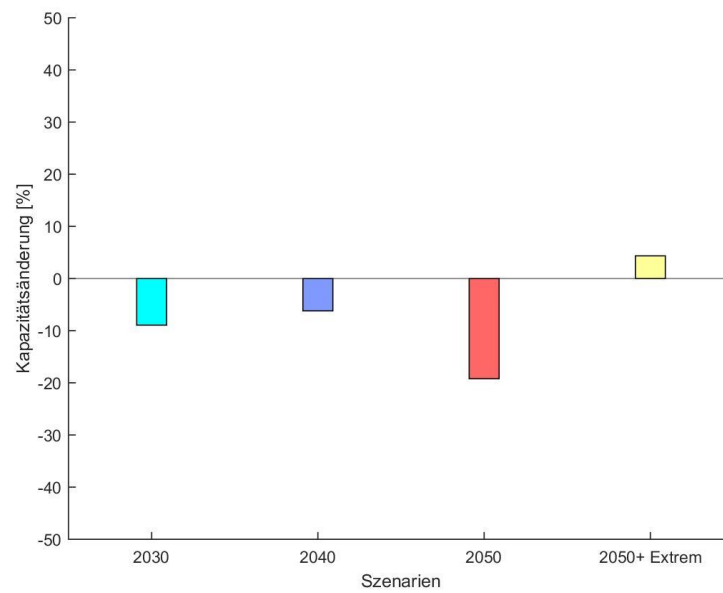
**Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 1**



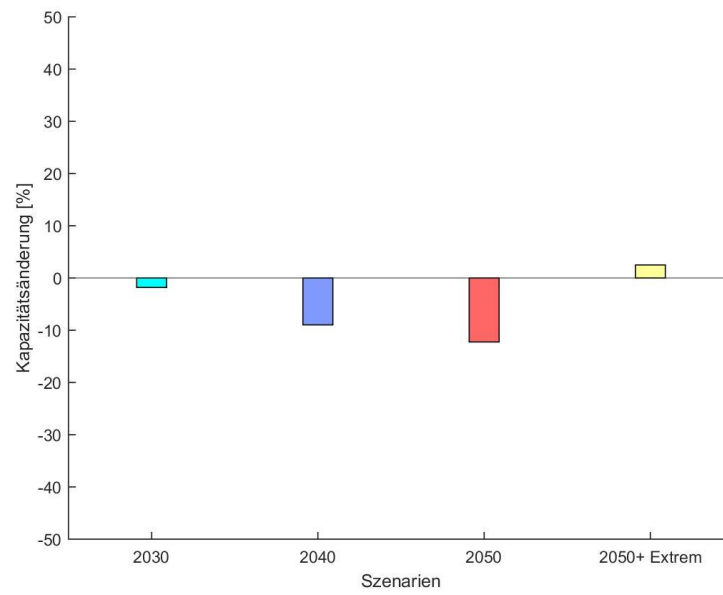
Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 2



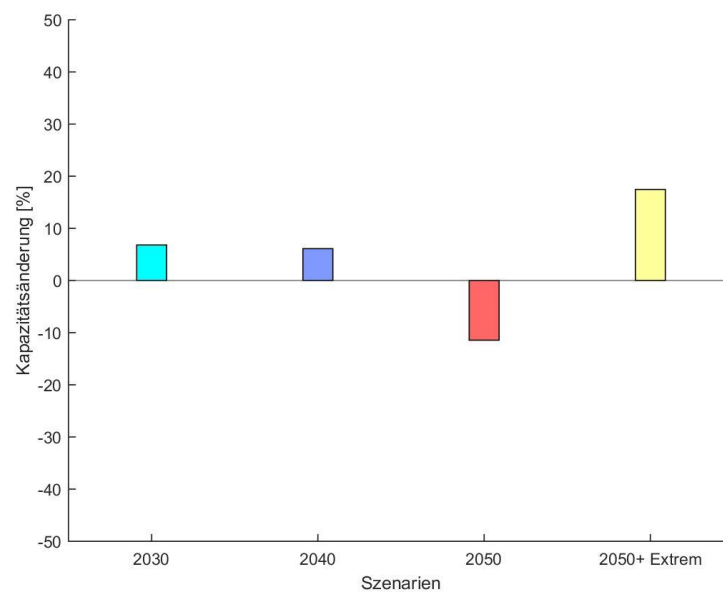
Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 3

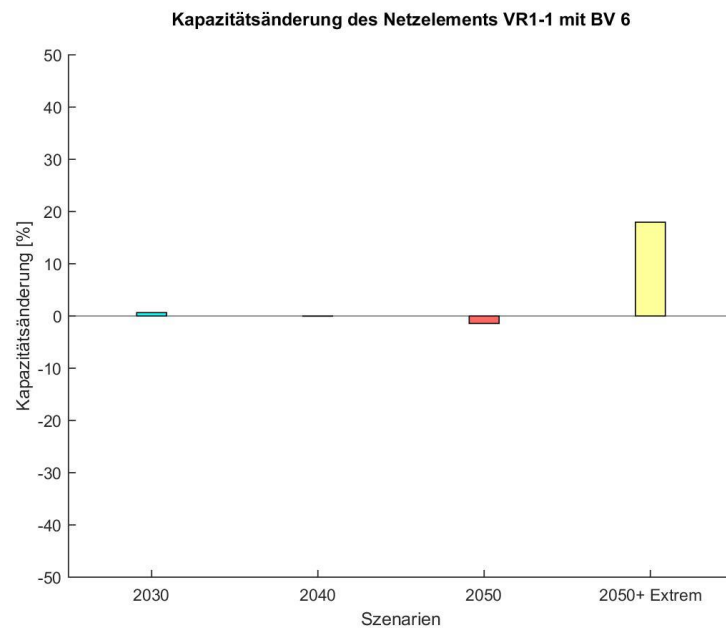


Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 4



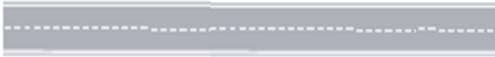
Kapazitätsänderung des Netzelements VR1-1 mit BV 5





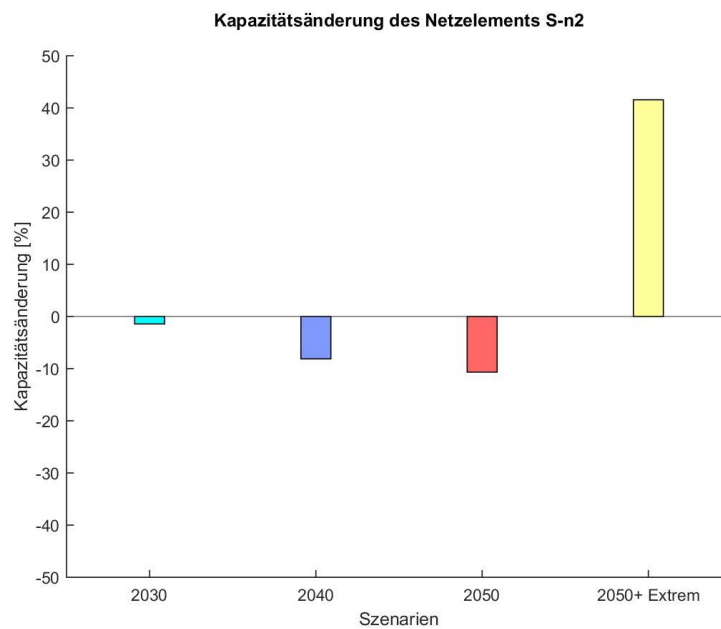


## 2 Fahrstreifen



**Tabelle 42** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n2

S-n2	Kapazität [Pkw-E/h]
Szenarien	
100 % Normalfahrer	4073
Szenario 2030	4015
Szenario 2040	3742
Szenario 2050	3639
Szenario 2050+ Extrem	5765

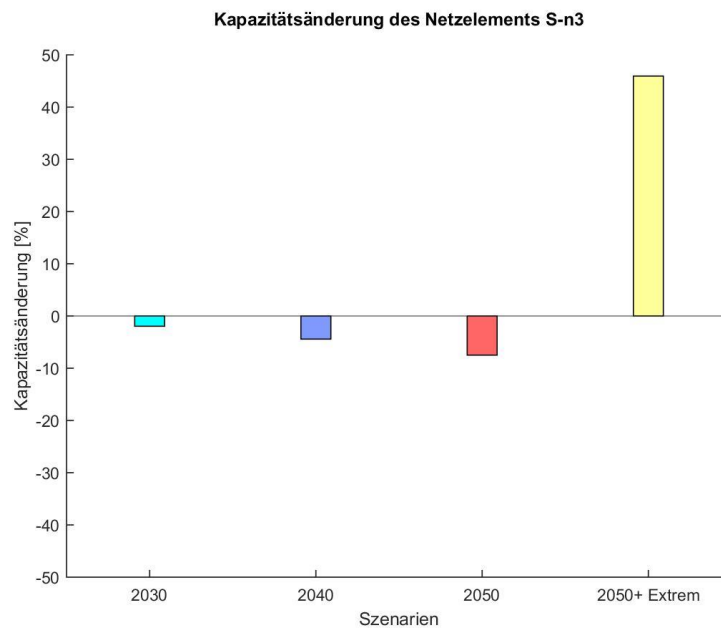


### 3 Fahrstreifen



**Tabelle 43** - Kapazitätswerte [Pkw-E/h] für das Netzelement S-n3

S-n3	Kapazität [Pkw-E/h]
Szenarien	
100 % Normalfahrer	5910
Szenario 2030	5794
Szenario 2040	5648
Szenario 2050	5467
Szenario 2050+ Extrem	8625



## 14 Anhang III

### Auslastungsgrad in der Spitzenstunde – Szenario 100% Normalfahrer (Basisfall)

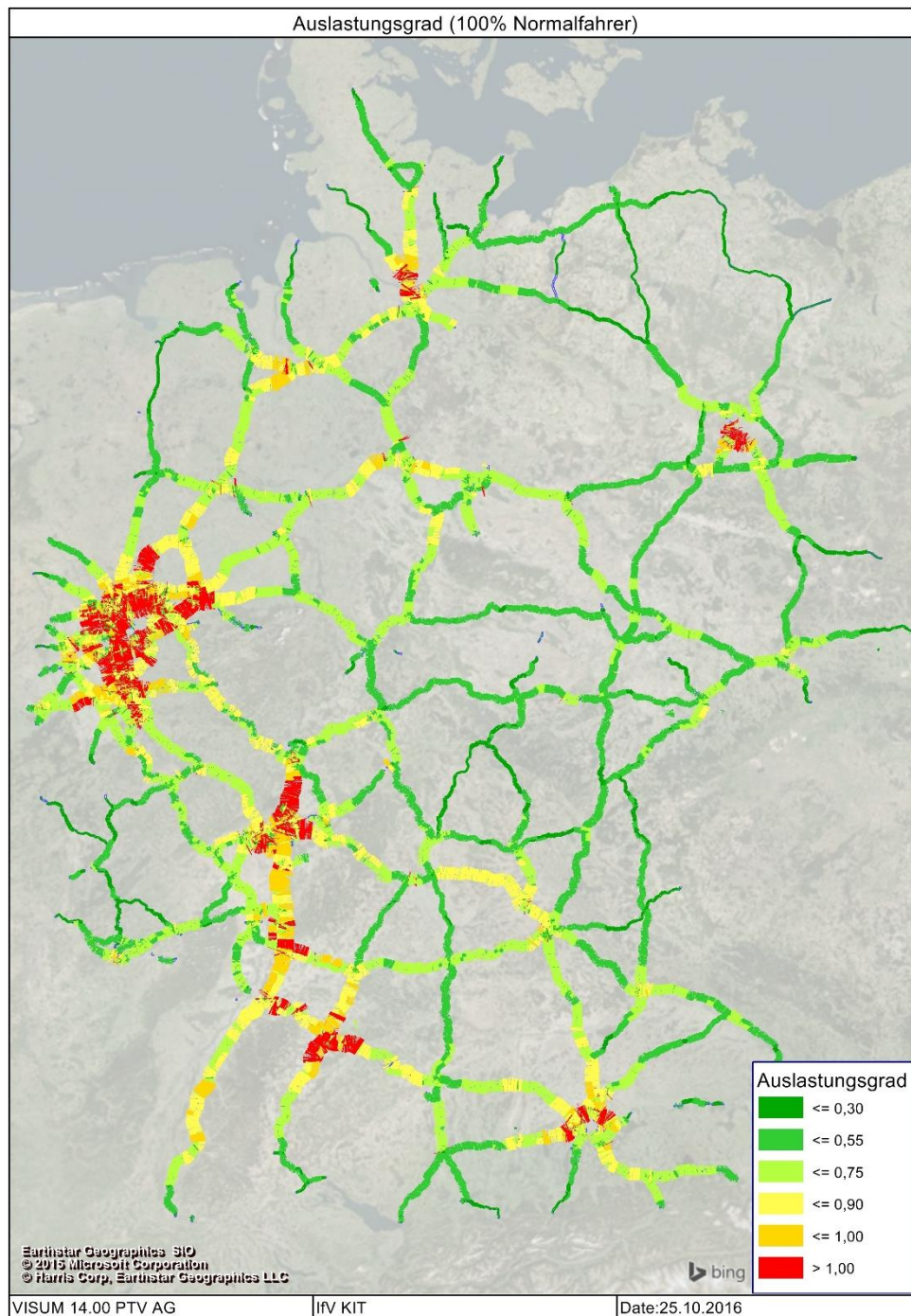


Abbildung 71 – Auslastungsgrad (Szenario 100% Normalfahrer)

## Auslastungsgrad in der Spitzenstunde – Szenario 100% kHAF (Vollautomatisierung)

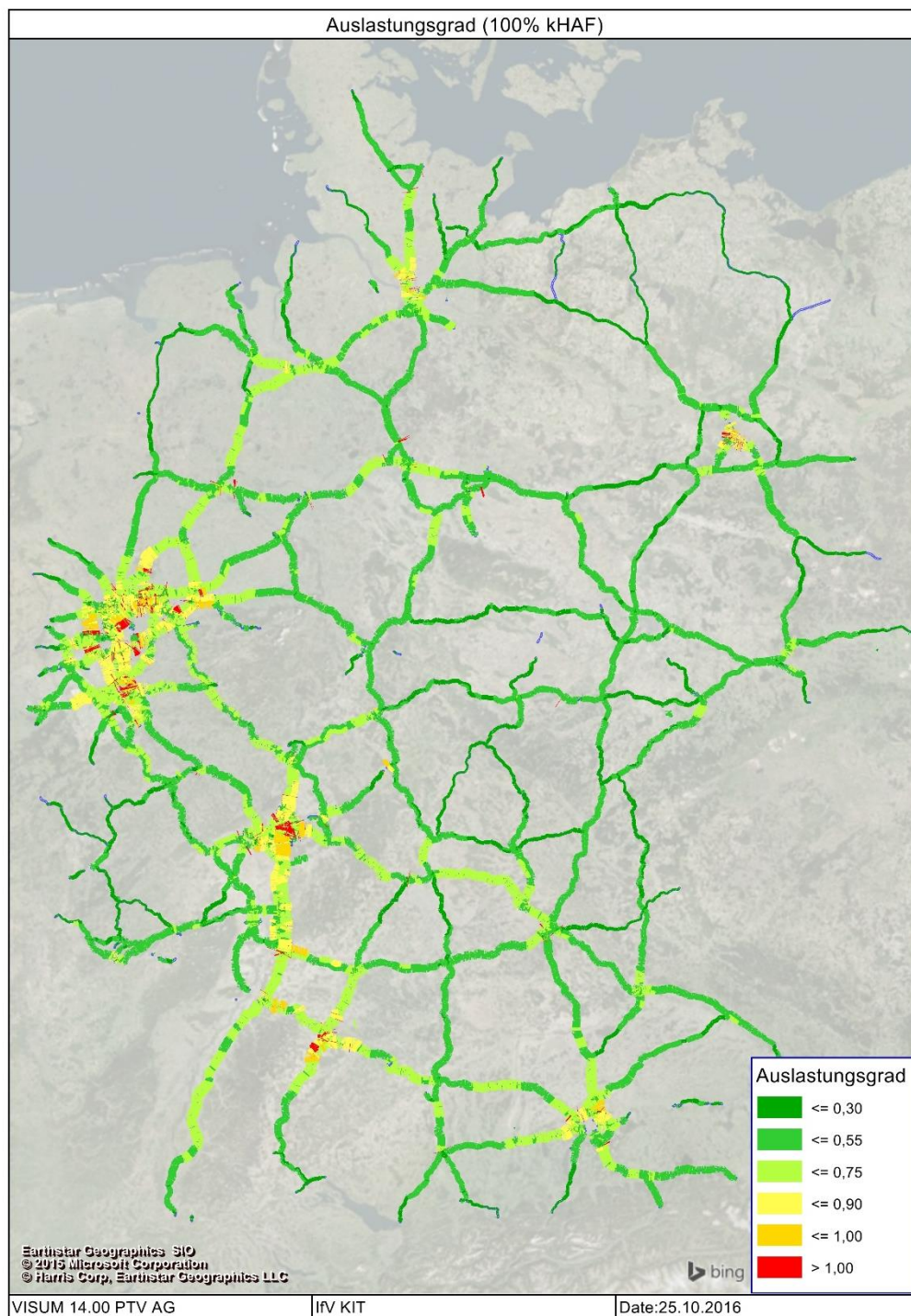


Abbildung 72 – Auslastungsgrad (Szenario 100% kHAF)

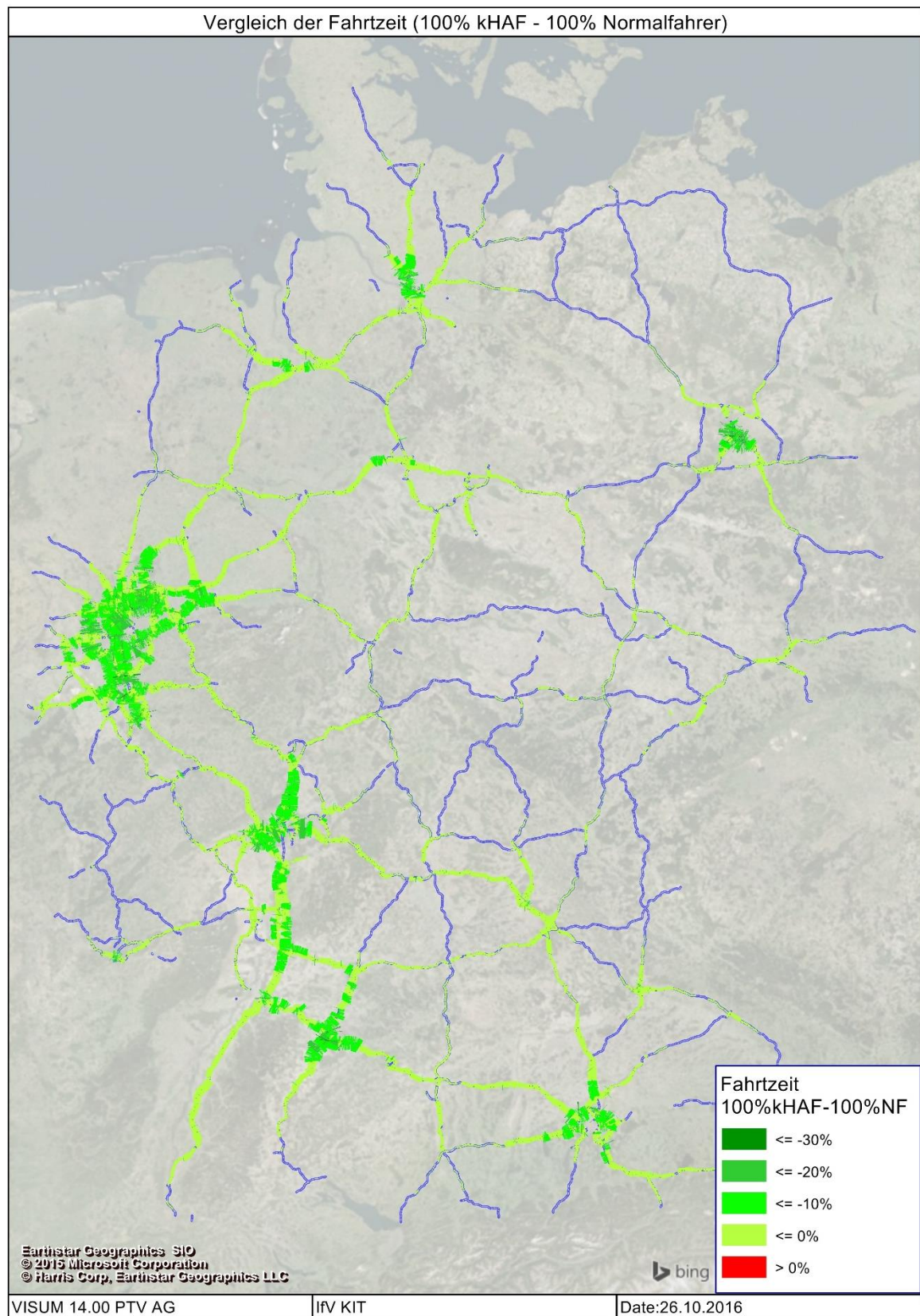
Vergleich der Fahrzeit (Tageswert)

Abbildung 73 – Vergleich der Fahrzeit (100% kHAF – 100% NF)

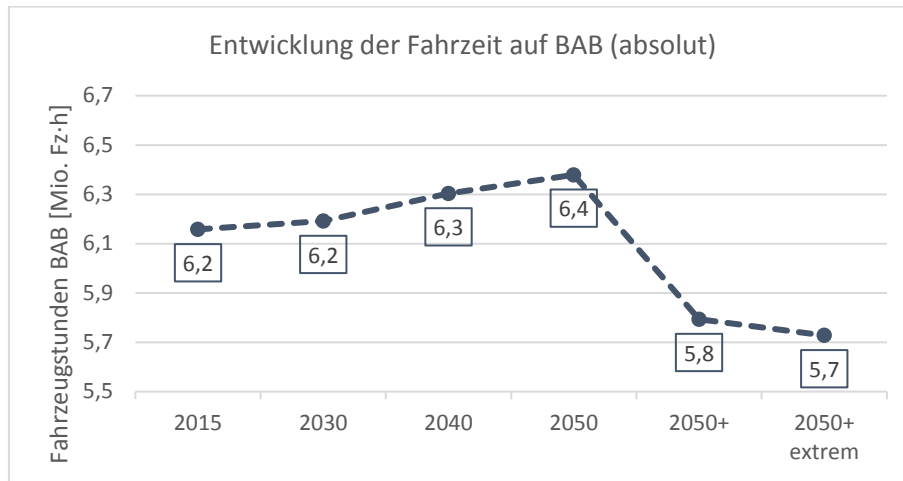


Abbildung 74 – Entwicklung der Fahrzeit (absolut)

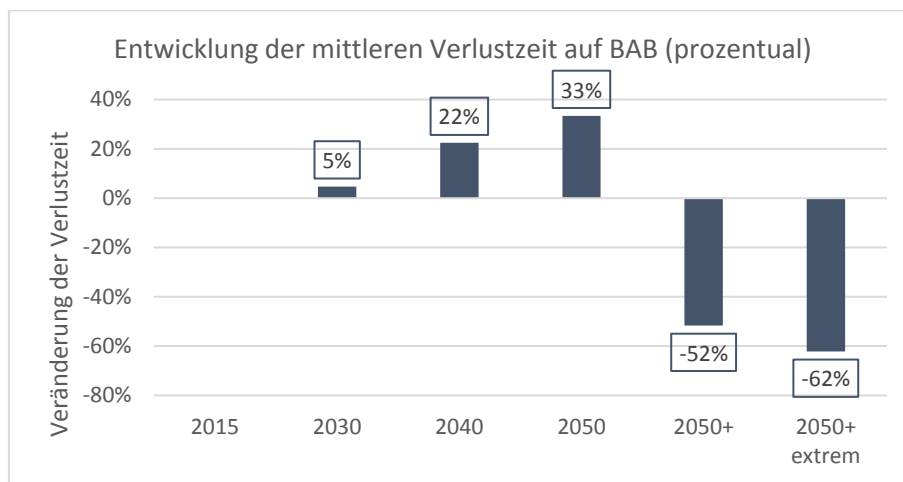


Abbildung 75 – Entwicklung der mittleren Verlustzeit (prozentual)

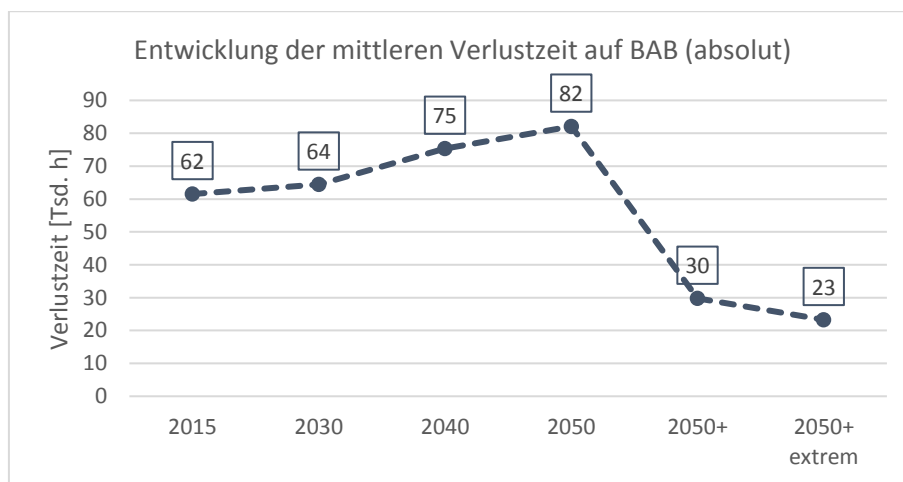


Abbildung 76 – Entwicklung der mittleren Verlustzeit (absolut)

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbern aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crash-simulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015



- 278 Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
- 279 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
- 280 PCM from iGLAD database, 2015
- 281 Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
- 282 Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
- 283 Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
- 284 Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
- 285 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
- 286  $\chi$ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feibleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2017

**VDA**

Verband der  
Automobilindustrie

**FAT**

Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)