

MEGAFON

Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des oeffentlichen Nahverkehrs

Auftraggeber

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.

Stuttgarter Straßenbahnen AG

Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH

Zuwendungsgeber

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Stand 12. Dezember 2016



Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und

Zuwendungsgeber Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg
Hauptstätter Str. 67
70178 Stuttgart

Auftraggeber Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV)
Kamekestraße 37 – 39
50672 Köln

Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB)
Schockenriedstraße 50
70565 Stuttgart

Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH (VVS)
Rotebühlstraße 121
70178 Stuttgart

Projektbearbeiter Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich
Maximilian Hartl, M. Sc.
Universität Stuttgart
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Projektbegleiter SSB Sebastian Noßwitz
VDV Dr.-Ing. Till Ackermann, Ulrich Weber
VVS Thomas Knöller

Stand 12. Dezember 2016

Kartengrundlagen Alle Hintergrundkarten stammen aus Open Street Map und stehen unter der Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL).
Alle Netzdaten und Gebietsdaten stammen aus dem Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart

Datengrundlagen Alle Netzdaten, Fahrplandaten und Nachfragedaten stammen aus dem Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	7
2	Modellbeschreibung und Annahmen	8
2.1	Untersuchungsraum und Bezugszeitraum	8
2.2	Nachfragedaten	9
2.3	Betrachtete Modi	9
2.4	Annahmen	10
3	Szenarien	13
4	Nachfrageberechnung	14
4.1	Aufteilung der Personenfahrten	14
4.2	Umwandlung von Personenfahrten in Fahrzeugfahrten	15
4.3	Umlaufbildungsalgorithmus	16
5	Verkehrsnachfrage	19
5.1	Verkehrsnachfrage heute	19
5.2	Verkehrsnachfrage mit AV	20
6	Ergebnisse im Überblick	23
6.1	Anzahl der Fahrzeuge	23
6.2	Anzahl Fahrzeugfahrten	25
6.3	Fahrzeugkilometer	27
6.4	Fahrzeugkilometer nach Besetzungsgrad	29
6.5	Fahrzeugnutzung pro Tag	32
6.6	Erforderliche Stellplätze	34
6.7	Energieverbrauch	36
7	Ergebnisse je Szenario	38
7.1	Szenario 1: 0% AV-NS, 100% AV-CS mit Bahn	40
7.2	Szenario 2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn	42
7.3	Szenario 3: 0% AV-NS, 100% AV-CS ohne Bahn	44
7.4	Szenario 4: 0% AV-NS, 100% AV-RS ohne Bahn	46

7.5	Szenario 5: 50% AV-NS, 50% AV-CS mit Bahn	48
7.6	Szenario 6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn	50
7.7	Szenario 7: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn	52
7.8	Szenario 8: 75% AV-NS, 25% AV-RS mit Bahn	54
7.9	Szenario 9: 50% AV-NS, 25% AV-CS, 25% AV-RS mit Bahn	56
7.10	Vergleich der Szenarien	58
8	Betreiberkonzept	60
8.1	Anfangsinvestition	60
8.2	Mögliche Kosteneinsparungen	61
8.3	Betriebskosten	61
9	Fazit	63
10	Ausblick	66
11	Glossar / Definitionen	68
12	Anhang	69
12.1	Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge VRS	69
12.2	Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge LHS	72
12.3	Relative Änderung der Belastungen im Zentrum	75
13	Literaturverzeichnis	80

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Region Stuttgart	8
Bild 2:	Verkehrszellen in den Kreisen der Region Stuttgart	9
Bild 3:	Zu- und Abholfahrten zum Bahnhof im Fall heutigen Zustand mit Bus (rot) und im Fall mit AV (blau)	11
Bild 4:	Nachfrageberechnung	14
Bild 5:	Verkehrsmoduswahl	15
Bild 6:	Beispiel von Umlaufbildungen	18
Bild 7:	Pkw Fahrzeuge und Verkehrsnachfrage im heutigen Zustand (2010)	19
Bild 8:	Verkehrsnachfrage (Personenwege) im heutigen Zustand und im Zustand mit autonomen Fahrzeugen	21
Bild 9:	Verkehrsnachfrage der Personenwege im Netz im Zustand mit autonomen Fahrzeugen	22
Bild 10:	Anzahl AV Fahrzeuge	24
Bild 11:	Anzahl der Fahrzeugfahrten differenziert nach Modus und Last- bzw. Leerfahrten	26
Bild 12:	Fahrzeugkilometer differenziert nach Modus und Last- bzw. Leerfahrten	28
Bild 13:	Anteil der Fahrzeugkilometer differenziert nach Besetzungsgrad	30
Bild 14:	Besetzungsgrad der Fahrzeuge im Modus AV-Ridesharing	31
Bild 15:	Fahrzeugnutzung pro Tag: Bezugsgröße (oben) alle AV, Bezugsgröße (unten) AV-Sharing	33
Bild 16:	Anzahl erforderlicher Stellplätze	34
Bild 17:	Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge für Szenario 1 (oben) und für Szenario 2 (unten) im Vergleich zum Ist-Zustand für zwei Tageszeiten (Nachts, morgendliche Hauptverkehrszeit)	35
Bild 18:	Endenergieverbrauch	37
Bild 19:	Steckbrief Szenario 1	41
Bild 20:	Steckbrief Szenario 2	43
Bild 21:	Steckbrief Szenario 3	45
Bild 22:	Steckbrief Szenario 4	47
Bild 23:	Steckbrief Szenario 5	49
Bild 24:	Steckbrief Szenario 6	51
Bild 25:	Steckbrief Szenario 7	53
Bild 26:	Steckbrief Szenario 8	55
Bild 27:	Steckbrief Szenario 9	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wartezeit in Kombination der Verkehrsmittelwahl	12
Tabelle 2: Szenarien	13
Tabelle 3: Aufteilung der Fahrzeugfahrten nach Modus und Betriebszustand	25
Tabelle 4: Ausgewählte Kenngrößen der Szenarien im Überblick	58
Tabelle 5: Vergleich der Szenarien im Hinblick auf die Fahrleistung, die Netzbelastung und den Verkehrsfluss	59
Tabelle 6: Investitionskosten für Rideselling Fahrzeugflotte	60
Tabelle 7: Berechnung der Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer	61
Tabelle 8: Kilometerkosten pro Nutzer für positives Betriebsergebnis	62
Tabelle 9: Eigenschaften der verschiedenen Pkw-Systeme	63

1 Aufgabenstellung

Autonom fahrende Fahrzeuge (autonomous vehicle = AV), die fahrerlos Ortsveränderungen durchführen, können Mobilität und Verkehr grundlegend verändern. Zu welchem Zeitpunkt es fahrerlose Pkw und Busse geben wird und die Fahrzeuge im gesamten Straßennetz einsetzbar sind, ist im Moment nicht abschätzbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass es autonom fahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr geben wird, ist aber so hoch, dass sich die Verkehrsplanung mit dem Thema beschäftigen sollte. Fahrerlose Fahrzeuge ermöglichen ein anderes Verkehrsangebot. Es wird erwartet, dass dieses Angebot u.a. die folgenden Eigenschaften aufweist:

- Der Autoverkehr wird sicherer.
- Das Autofahren wird komfortabler, da die Fahrzeit im Fahrzeug für fahrfremde Tätigkeiten genutzt werden kann.
- Die Leistungsfähigkeit des Straßennetzes wird steigen.
- Ein fahrerloses Umsetzen der Fahrzeuge ermöglicht neue Mobilitätsangebote beim Carsharing und Ridesharing bzw. Rideselling. Es ermöglicht außerdem attraktive intermodale Ortsveränderungen, bei denen ein Sharing-Fahrzeug den Fahrgast in Gebieten mit schlechtem ÖPNV-Angebot zur Bahn bringt.

Diese Änderungen auf der Angebotsseite werden die Verkehrsnachfrage beeinflussen. Ein besseres Angebot kann die Reiseweite der Verkehrsteilnehmer erhöhen und die Verkehrsmittelwahl zugunsten des Pkw beeinflussen. Die resultierende Nachfrage und der Verkehrsfluss im Pkw-Verkehr kann im Hinblick auf verkehrsplanerische Ziele – gute Angebotsqualität, Schonung der Ressourcen, angemessene Stadtverträglichkeit hohe Verkehrssicherheit – mehr oder weniger wünschenswert sein. Verschiedene Studien und Positionspapiere (Vgl. Isaac 2015, OECD 2015, Hazan, J. et al. (2016) und VDV 2015) beschreiben die Bandbreite möglicher Szenarien von „Driverless Nightmare bis „Driverless Utopia“ (Issac, Seite 9ff) sowie „Tod des ÖPNV“ oder „Teil des ÖPNV“ (VDV).

Ziel des Projekts MEGAFON ist es, mögliche Wirkungen autonomer Fahrzeuge auf den Verkehr in Stadtregionen mit Hilfe von Szenarien beispielhaft zu untersuchen. Das Projekt MEGAFON orientiert sich dabei an der Studie „Urban Mobility System Upgrade – How shared self-driving cars could change city traffic“ des Internationalen Transport Forums der OECD (OECD, 2015). In dieser Untersuchung werden am Beispiel der Stadt Lissabon die Wirkungen von autonom fahrenden Fahrzeugen auf den städtischen Verkehr dargestellt. Die Studie definiert 8 Szenarien, in denen die Fahrten im motorisierten Verkehr in unterschiedlichem Umfang entweder mit autonomen Carsharing- oder Ridesharing-Systemen abgewickelt werden. Für jedes Szenario werden u.a. die Zahl der erforderlichen Pkw, die Pkw-Fahrzeugkilometer und die Zahl der erforderlichen Stellplätze ermittelt und mit dem heutigen Zustand verglichen.

Die offensichtlich negativen Auswirkungen eines „Laissez-faire“-Szenarios, in dem die technologische Entwicklung ohne flankierende Maßnahmen als Fortschreibung des privatbesessenen Pkw auf die Straßen der Region kommen, wurden nicht betrachtet.

2 Modellbeschreibung und Annahmen

Aufbauend auf den Vorgaben der OECD-Studie wird im Projekt MEGAFON von den im Folgenden beschriebenen Annahmen ausgegangen. Abweichungen zur OECD-Studie werden an entsprechender Stelle erläutert.

2.1 Untersuchungsraum und Bezugszeitraum

Untersuchungsraum ist die Region Stuttgart mit den Kreisen Böblingen, Esslingen, Göppingen, Ludwigsburg, Rems-Murr und Stuttgart. Untersucht wird der gesamte motorisierte Personenbinnenverkehr dieser Region, d. h. alle Wege mit Quelle und Ziel in der Region Stuttgart, die mit dem Pkw, mit dem ÖV oder als Pkw-Mitfahrer durchgeführt werden. Für den Quell-, Zielverkehr und Durchgangsverkehr werden keine Veränderungen angenommen. Ortsveränderungen mit dem Lkw, zu Fuß oder mit dem Rad werden ebenfalls nicht verändert. Es wird die Nachfrage eines normalen Werktages des Jahres 2010 unterstellt, da für dieses Jahr umfassende Daten vorliegen. Für das Verkehrsangebot im Straßennetz und im öffentlichen Verkehr wird der Angebotszustand für das Jahr 2025 gewählt. In diesem Zustand sind alle Maßnahmen im Straßen- und Schienennetz, die im Regionalverkehrsplan bis 2025 als wahrscheinlich umgesetzt gelten, angenommen. Stuttgart 21 ist Bestandteil dieses Zustands.

Die Region Stuttgart steht als Beispiel eines monozentrischen Ballungsraumes mit gut ausgebauter ÖV-Infrastruktur und den üblichen Überlasterscheinungen im MIV sowie im ÖPNV.

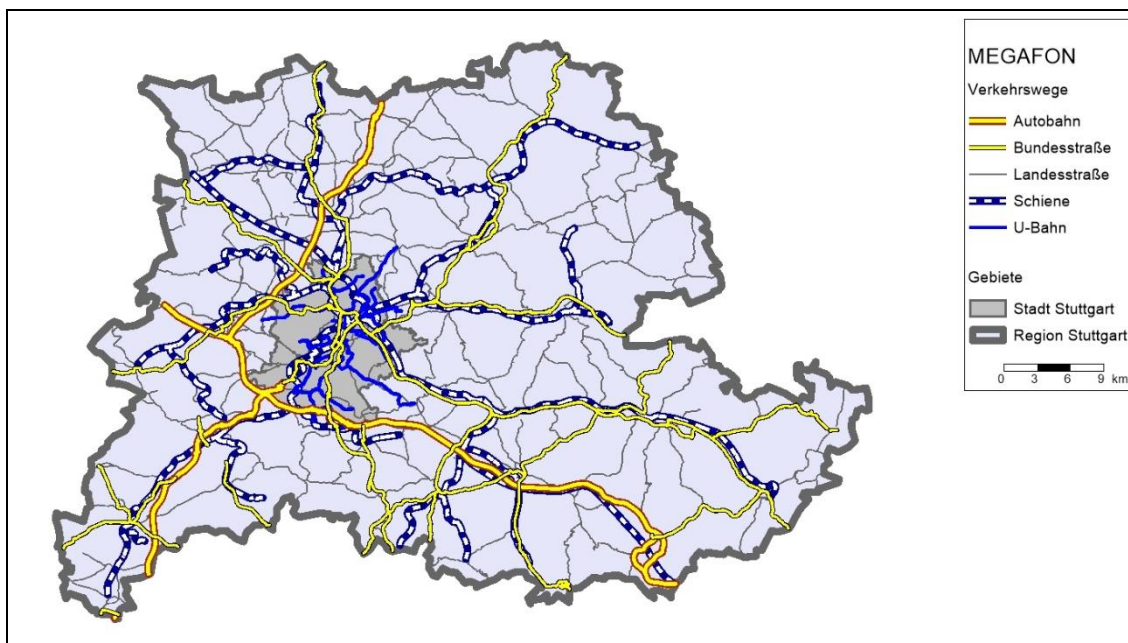


Bild 1: Region Stuttgart

2.2 Nachfragedaten

Für die Untersuchung stehen Nachfragedaten aus dem makroskopischen und dem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart zur Verfügung. Die Modelldaten sind im Besitz des Verbands Region Stuttgart (VRS) und können für die Untersuchung genutzt werden. Beide Modelle wurden für das Bezugsjahr 2010 mit Daten einer Haushaltsbefragung kalibriert. In dieser Haushaltsbefragung wurden 293.000 Ortsveränderungen von rund 13.700 Personen in 5.600 Haushalten über den Zeitraum einer Woche erfasst.

Für die Berechnungen werden die Daten des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells¹ genutzt. Dieses Modell bildet die Nachfrage der 2,7 Millionen Einwohner nach und differenziert dabei die fünf Verkehrsmodi Fuß, Rad, ÖV, Pkw-Selftfahrer, Pkw-Mitfahrer. Für jeden Weg sind die Quellzelle, die Zielzelle, der Modus, der Wochentag, die Abgangszeitminute und die Ankunftszeitminute bekannt. Quellen und Ziele sind die 1.013 Verkehrszellen des Verkehrsnachfragemodells.

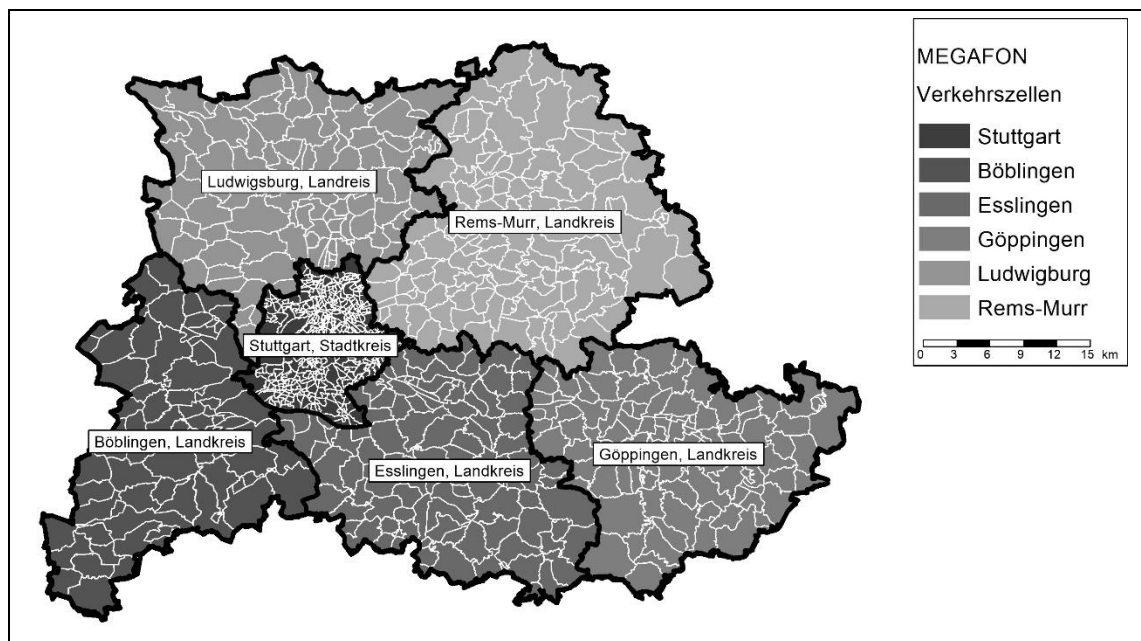


Bild 2: Verkehrszellen in den Kreisen der Region Stuttgart

2.3 Betrachtete Modi

Die Einführung von autonomen Fahrzeugen wird die Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln verändern. Die Untersuchung geht von der Annahme aus, dass das Verkehrssystem Bus

¹ Modellersteller Institut für Verkehrswesen am KIT (IfV). Implementierung in der Modellierungssoftware mobiTopp (mikroskopisches Multi-Agenten-Nachfragemodell, Eigenentwicklung IfV), gekoppelt mit den Angebotsdaten aus dem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region (VISUM).

komplett durch AV ersetzt wird². Buslinien mit festem Linienweg und Fahrplänen wird es in der heutigen Form nicht mehr geben. Die Fahrtwünsche von Passagieren im heutigen Busverkehr werden vollständig durch AV bedient. Der Schienenpersonennahverkehr bleibt dagegen in den meisten Szenarien erhalten. Er kann mit AV im Vor- oder Nachlauf verknüpft werden. Im Projekt MEGAFON werden die folgenden Modi unterschieden:

- Private AV (AV-NS): Fahrzeuge, die wie heute im Privatbesitz sind und nur von den Personen einer Familie genutzt werden (NS = NoSharing). Es wird davon ausgegangen, dass diese Fahrzeuge keine Leerfahrten durchführen.
- Öffentliche AV im Modus private Nutzung (AV-CS): Fahrzeuge, die als Teil eines Carsharing-Systems von mehreren Personen nacheinander genutzt werden. Die Fahrzeuge werden bei Bedarf als Leerfahrt umgesetzt, um den nächsten Fahrgast zu bedienen. Die Fahrzeuggröße entspricht einem Standard-Pkw.
- Öffentliche AV im Modus öffentliche Nutzung (AV-RS): Fahrzeuge, die als Teil eines Ridesharing-Systems von mehreren Personen gleichzeitig genutzt werden³. Die Fahrzeuge sammeln mehrere Fahrgäste und bringen sie zu ihren individuellen Zielen. Sie werden bei Bedarf als Leerfahrt umgesetzt. Es können Fahrzeuge unterschiedlicher Größe eingesetzt werden. In MEGAFON wird eine Fahrzeuggröße angenommen, die 6 Personen transportieren kann.
- ÖV-Schiene (Bahn): Fahrgäste werden mit öffentlichen Schienenfahrzeugen befördert. Die Fahrzeiten und das Fahrtenangebot entsprechen dem für das Jahr 2025 geplanten Fahrplanangebot.
- Bahn + CS: Kombination von Bahn und Carsharing im Vor- und/oder Nachlauf.
- Bahn + RS: Kombination von Bahn und Ridesharing im Vor- und/oder Nachlauf.

2.4 Annahmen

Die Modellrechnungen basieren auf mehreren Annahmen:

- Die gesamte Verkehrsnachfrage wird durch AV nicht verändert, d.h. es gibt keine Änderungen bei der Zahl der Personenwege (Verkehrserzeugung) und bei der Reiseweite bzw. Zielwahl. Die Verkehrsmittelwahl wird im Modell nicht durch Preise beeinflusst.
- Der Anteil der Wege, der zu Fuß oder mit dem Rad zurückgelegt wird, bleibt gleich und wird in der Untersuchung nicht weiter betrachtet. Betrachtet wird die Nachfrage, die heute mit motorisierten Verkehrsmitteln zurückgelegt wird.

² Eine andere Annahme wäre für beschleunigte Bussysteme (Bus-Rapid-Transit) mit mehr als 10.000 Fahrgäste/Tag in Frage gekommen.

³ Korrekt wäre hier der Begriff „Rideselling“, da hier eine gewerbliche Dienstleistung erbracht wird und der einzelne Sitzplatz bzw. die einzelne Mitfahrt verkauft wird.

Verkehrsmittelkombination	Wartezeiten	Bestandteile
Fuß – Bahn – Fuß	4 min	Startwartezeit
Fuß – Bahn – AV-Nachlauf	8 min	Startwartezeit, Übergangszeit
AV-Vorlauf – Bahn – Fuß	8 min	Anmeldezeit, Übergangszeit
AV-Vorlauf – Bahn – AV-Nachlauf	12 min	Anmeldezeit, 2 x Übergangszeit
AV-direkt*	8 min	Anmeldezeit, Einsammelzeit
* Im Projekt wird vereinfachend angenommen, dass bei AV-CS und AV-RS die gleichen Wartezeiten auftreten. In der Realität werden Fahrten mit AV-CS schneller sein als mit AV-RS, da keine Zeitverluste für das Einsammeln von Mitfahrern auftreten. Die getroffene Annahme führt in Szenarien mit dem Modus Bahn zu identischen Nachfragematrizen. Das erleichtert die Vergleichbarkeit der Szenarien. In der Realität wird der Anteil im Modus Bahn in Szenarien mit Carsharing etwa 10% niedriger sein als in Szenarien mit Ridesharing.		

Tabelle 1: Wartezeit in Kombination der Verkehrsmittelwahl

- Die Geschwindigkeiten im Pkw-Verkehr entsprechen den typischen Geschwindigkeiten in der Hauptverkehrszeit im heutigen Zustand ohne AV. Verlängerungen oder Verkürzungen der Fahrzeit, die sich aus mehr oder weniger Pkw-Fahrten oder aus einer höheren Leistungsfähigkeit des AV ergeben, werden nicht berücksichtigt. In städtischen Netzen wird die zulässige Kfz-Geschwindigkeit jedoch wie folgt reduziert:
 - Bundesstraßen 50 km/h (in der Regel wie heute)
 - Verbindungsstraße 30 km/h (heute in der Regel 50 km/h)
 - Erschließungsstraße 20 km/h (heute in der Regel 30 km/h)
- Wege beginnen und enden in Verkehrszellen. Die Zeitverluste durch das Einsammeln und Verteilen von Fahrgästen in einer Zelle und das Umsetzen von AV in einer Zelle wird durch einen pauschalen Zeit- und Längenzuschlag abgeschätzt, der in Abhängigkeit der Zellengröße ermittelt wird.
- Es wird keine nutzenbasierte Verkehrsmoduswahlberechnung durchgeführt, die basierend auf den Eigenschaften der konkurrierenden Modi (Beförderungszeit, Zu- und Abgangszeit, Umsteigehäufigkeit, Preis) und den Eigenschaften der Nutzer (z.B. Pkw-Verfügbarkeit) einen Anteil für jeden Modus abschätzt. Stattdessen erfolgt die Aufteilung auf die drei Modi Bahn, AV-CS und AV-RS entsprechend den definierten Szenarien nach vorgegebenen Anteilen. Bei der Wahl zwischen dem Modus Bahn und AV wird immer der Modus gewählt, mit dem der Verkehrsteilnehmer am schnellsten an das Ziel kommt.

Durch diese modellbedingten Annahmen werden die erwarteten Effekte von privat besessenen autonomen Fahrzeugen (AV-NS) wie Mehrverkehre durch Leerfahrten, komfortbedingt induzierter Verkehr und langfristig die weitere Zersiedelung nicht betrachtet.

3 Szenarien

Die Szenarien definieren die Anteile der Nachfrage, die auf die Modi Bahn (Schienenpersonenverkehr, Stadtbahn), privates AV (NoSharing), AV-Carsharing und AV-Ridesharing entfallen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die neun untersuchten Szenarien. Die Szenarien 1 bis 6 entsprechen der OECD-Studie. Die Szenarien 6 bis 9 weichen von der OECD Studie ab und variieren den Anteil der Sharing-Nachfrage. Der Bus wird in jedem Szenario komplett ersetzt, in den Szenarien 3 und 4 zusätzlich die Bahn. In Szenario 9 werden die beiden Sharing Modi kombiniert.

Szenario		Aufteilung der Nachfrage			
		Bahn	AV– NoSharing	AV- Carsharing	AV- Ridesharing
1	0% AV-NS, 100% AV-CS, mBahn	ja	0%	100%	0%
2	0% AV-NS, 100% AV-RS, mBahn	ja	0%	0%	100%
3	0% AV-NS, 100% AV-CS, oBahn	nein	0%	100%	0%
4	0% AV-NS, 100% AV-RS, oBahn	nein	0%	0%	100%
5	50% AV-NS, 50% AV-CS, mBahn	ja	50%	50%	0%
6	50% AV-NS, 50% AV-RS, mBahn	ja	50%	0%	50%
7	75% AV-NS, 25% AV-CS, mBahn	ja	75%	25%	0%
8	75% AV-NS, 25% AV-RS, mBahn	ja	75%	0%	25%
9	50% AV-NS, 25%AV-CS, 25% AV-RS, mBahn	ja	50%	25%	25%

Tabelle 2: Szenarien

4 Nachfrageberechnung

Die Nachfrageberechnung erfolgt in drei Schritten (siehe Bild 4):

1. Die heutige Nachfrage der Personenfahrten im motorisierten Verkehr (Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer, ÖV) wird auf die Modi Bahn, AV ohne Sharing (AV-NS) und AV mit Sharing (AV-CS, AV-RS) aufgeteilt.
2. Die Matrix der Personenfahrten mit AV-Sharing wird in eine Matrix der Fahrzeugfahrten umgewandelt. Beim Carsharing wird hierfür ein konstanter Besetzungsgrad angenommen. Beim Ridesharing werden die Personenfahrten gebündelt.
3. Die Fahrzeugfahrten mit Pkw-Sharing werden so zu Umläufen verknüpft, dass die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge möglichst gering ist. Dadurch entstehen zusätzliche Leerfahrten.

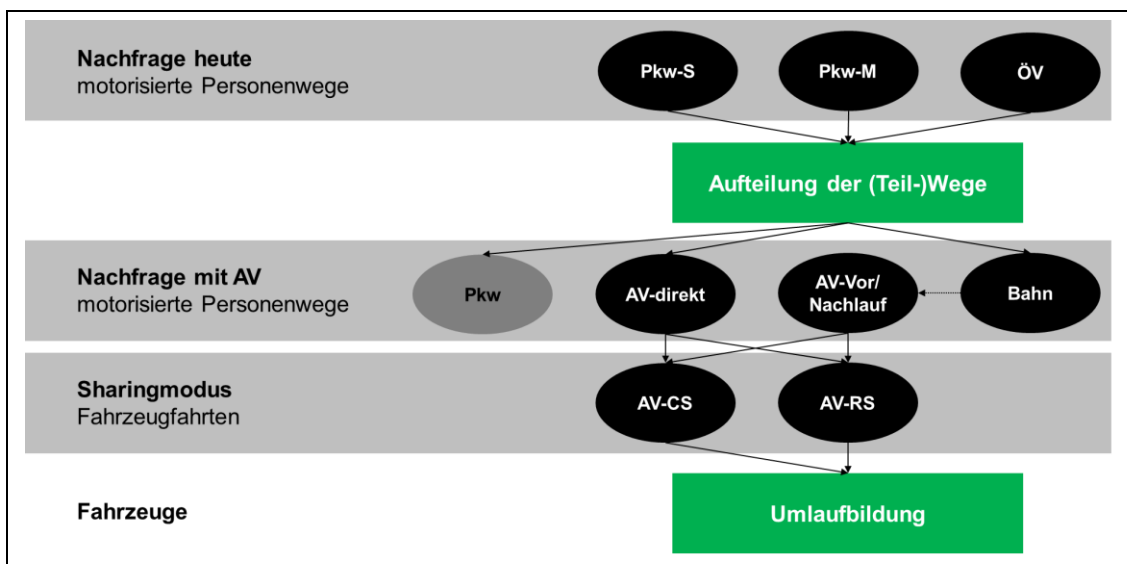


Bild 4: Nachfrageberechnung

4.1 Aufteilung der Personenfahrten

In diesem Arbeitsschritt werden die Personenfahrten für alle neun Szenarien differenziert nach den relevanten Modi (siehe Tabelle 2) ermittelt. Ausgangspunkt ist die gesamte Nachfrage im motorisierten Personenverkehr im Jahr 2010 (Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer, ÖV) aus dem Mikromodell.

Für Szenarien mit Bahn wird der Teil der Nachfrage allein dem Modus Bahn zugeordnet, für den gilt:

- Quelle und Ziel liegen an einem Bahnhof
- Reisezeit Bahn < Reisezeit AV

Für Szenarien mit Bahn wird der Teil der Nachfrage der Bahn und dem AV (im Vorlauf und/oder Nachlauf zur Bahn) zugeordnet, für den gilt:

- Reisezeit Bahn mit Vor- und Nachlauf < Reisezeit AV

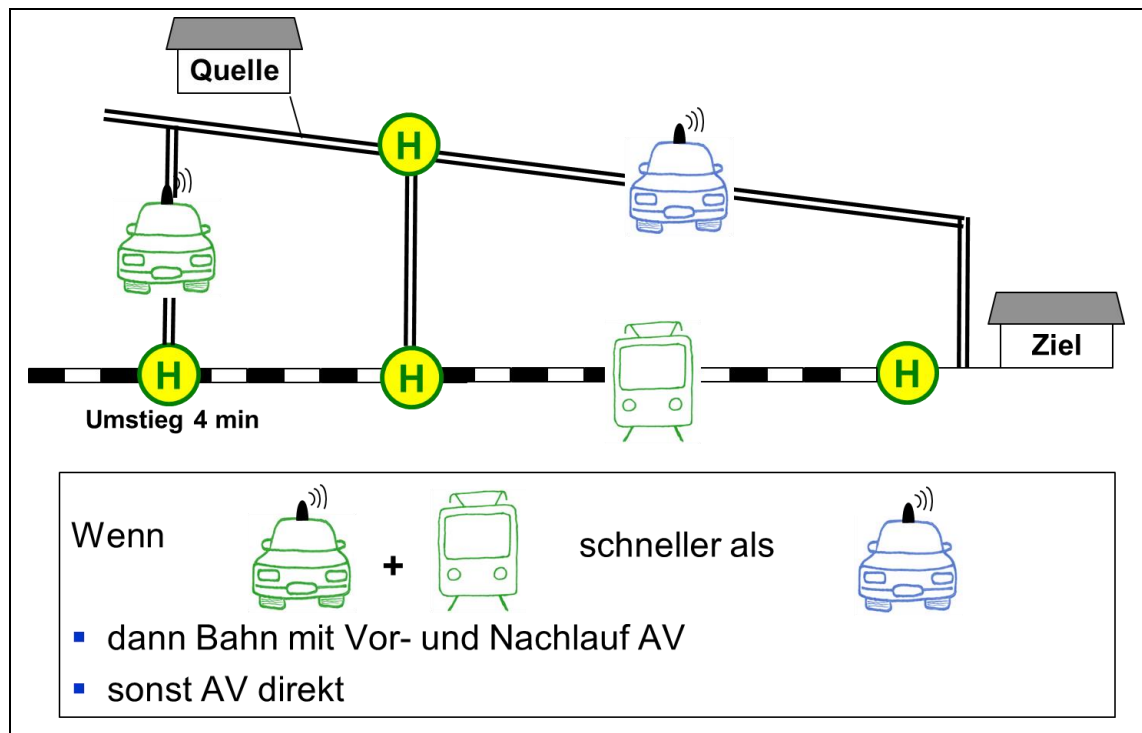


Bild 5: Verkehrsmoduswahl

Ergebnis der Nachfrageaufbereitung ist die Ermittlung der Wege- bzw. Teilwege, die mit AV-NS, Bahn, AV-CS oder AV-RS zurückgelegt werden. Nach der Aufteilung liegen alle Wege, auch die intermodalen Wege mit der Bahn, als Daten in Form von Matrizen für die Quellzelle, Zielzelle, Abfahrtszeit und Ankunftszeit vor. Die Daten werden in 96 Matrizen gehalten, die jeweils ein 15 Minuten Zeitintervall umfassen.

4.2 Umwandlung von Personenfahrten in Fahrzeugfahrten

Bei Szenarien mit Carsharing wird angenommen, dass der heutige Besetzungsgrad von 1,3 Personen pro Fahrzeug wieder erreicht wird, d. h. das Fahrzeug wird in gleicher Weise wie heute genutzt.

Beim Ridesharing werden Personenfahrten mit einem Bündelungsalgorithmus in Fahrzeugfahrten umgewandelt. Dabei müssen die Personenfahrten auf geeignete Weise zusammengefasst werden. Hierfür kommt ein Algorithmus zum Einsatz, der folgende Schritte durchführt:

- Vorberechnungen: Alle Straßenstrecken, an denen Mitfahrer aufgenommen werden können, werden markiert. So wird sichergestellt, dass u.a. auf Autobahnen keine

Mitfahrer zusteigen können. Jeder markierten Straßenstrecke wird eine Verkehrszelle zugewiesen.

- Routenbestimmung: Für jede nachgefragte Personenfahrt wird eine Fahrtroute als Streckenfolge im Netz von der Quelle zum Ziel ermittelt. Diese Streckenfolge wird reduziert auf eine Folge von Verkehrszellen, durch die die Personenfahrt führt.
- Tageszeitabhängige Nachfrage: Jede Personenfahrt wird als Fahrtwunsch mit einer Wunschabfahrtszeit in einem 15-Minutenzeitintervall zwischen 0 und 24 Uhr (96 Zeitintervalle) interpretiert, die innerhalb dieses Zeitraums bedient werden muss.
- Bündelung: Die Fahrtwünsche werden sequentiell abgearbeitet. Der erste Fahrtwunsch erzeugt eine Fahrzeugfahrt. Folgende Fahrtwünsche werden diesem Fahrzeugweg zugeordnet, wenn die Folge von Verkehrszellen komplett oder für eine Teilfolge übereinstimmt und das Fahrzeug noch Kapazität für einen weiteren Mitfahrer hat.
- Ergebnis: Eine Menge von Fahrzeugfahrten mit folgenden Eigenschaften: Quellzelle, Zielzelle, Abfahrtszeitminute, Zahl der Mitfahrer. Als Abfahrtszeit wird zufällig eine Minute gezogen, die im jeweiligen 15- Minutenzeitintervall liegt.

4.3 Umlaufbildungsalgorithmus

Die Fahrzeugfahrten für das Carsharing oder das Ridesharing sind Input für die Umlaufbildung. Die Umlaufbildung erfolgt für Car- und Ridesharing auf die gleiche Weise. Die Fahrten unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der beförderten Personen. Da es sich um AV handelt sind Umsetzfahrten möglich, um die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge zu reduzieren. Jeder Fahrzeugumlauf entspricht einem erforderlichen Fahrzeug. Da die Zahl der zu verknüpfenden Fahrzeugfahrten deutlich größer ist als bei ÖV-Fahrplanfahrten, muss die Verknüpfung vereinfacht und mehrstufig erfolgen. Die Verknüpfung von Fahrzeugfahrten erfolgt in vier Schritten, bei denen die Verknüpfungsbedingungen mit jedem Schritt gelockert werden:

1. Enge räumliche und enge zeitliche Randbedingungen: Fahrzeugfahrten werden dann verknüpft, wenn Ende der Vorgängerfahrt und Start der Folgefahrt in der gleichen Verkehrszelle liegen und die Wartezeit $< \epsilon$ ist ($\epsilon = 60$ Minuten). Die erforderliche Umsetzfahrt innerhalb der Verkehrszelle wird näherungsweise bestimmt. Die benötigte Umsetzzeit hängt von der Zellengröße ab, sie beträgt mindestens 4 Minuten. Der Längenzuschlag ist ebenfalls zellengrößenabhängig, mindestens jedoch 100 m.
2. Weichere räumliche und enge zeitliche Randbedingungen: Fahrzeugfahrten werden dann verknüpft, wenn das Ende der Vorgängerfahrt und Start der Folgefahrt im gleichen Gebiet (Stadtbezirk, Teilraum eines Landkreises) liegen und die Wartezeit $< \epsilon$ ist ($\epsilon = 60$ Minuten). Es entsteht eine nahräumige Umsetzfahrt, deren

Dauer und Entfernungszuschläge durch das Verkehrsangebot aus dem Modell der Region Stuttgart abgeleitet werden.

3. Weichere räumliche und weiche zeitliche Randbedingungen: Fahrzeugfahrten werden dann verknüpft, wenn Ende der Vorgängerfahrt und Start der Folgefahrt im gleichen Gebiet (Stadtbezirk, Teilraum eines Landkreises) liegen, zeitliche Einschränkungen werden vernachlässigt. Ergibt sich eine Verknüpfung innerhalb eines Gebiets wartet das AV ohne zeitliche Einschränkung. Unnötige lange Umsetzfahrten werden vermieden zu Lasten höherer Wartezeiten.
4. Weiche räumliche und weiche zeitliche Randbedingungen: Fahrzeugfahrten werden ohne räumliche und zeitliche Einschränkung miteinander verknüpft, wenn der Abfahrtszeitpunkt der nächsten Fahrt nach der Ankunftszeit der vorigen Fahrt liegt und die zeitliche Differenz so groß ist, dass die Distanz zwischen den Verkehrszellen in dieser Zeit zurückgelegt werden kann. Kommen mehrere Fahrten für die Verknüpfung in Frage, werden unnötige Umsetzkilometer vermieden. Mindestwartezeiten und Mindestumsetzzeiten in Verkehrszellen werden berücksichtigt.

Als Ergebnis liegen nach der Umlaufbildung Fahrzeugumläufe vor. Ein Umlauf wird beschrieben durch die Kenngrößen:

- Anzahl beförderter Personen, Personenstunden, Personenkilometer
- Beförderungszeit (Lastzeit), Umsetzzeit (Leerzeit), Wartezeit, Standzeit
- Beförderungskilometer (Lastkilometer), Umsetzkilometer (Leerkilometer)
- Liste der verknüpften Fahrzeugfahrten

Die Standzeit beschreibt den Zeitraum zwischen der letzten Nutzung eines Fahrzeuges an einem Tag und der ersten Nutzung des Fahrzeuges am Folgetag. Für ein Fahrzeug beträgt die Summe aus Beförderungszeit, Umsetzzeit, Wartezeit und Standzeit damit 24 Stunden.

In Bild 6 sind beispielhaft zwei Fahrzeugumläufe dargestellt. Der obere Fahrzeugumlauf stellt einen Durchlauf mit durchschnittlich vielen verknüpften Fahrzeugfahrten dar, während der untere Fahrzeugumlauf einen Umlauf mit überdurchschnittlich vielen Fahrzeugfahrten repräsentiert. Die räumlichen Ausprägungen können sich um einen Stadtbereich konzentrieren oder die ganze Region abdecken. Verknüpft werden die einzelnen Fahrzeugfahrten durch Leerfahrten. Leerfahrten finden entweder innerhalb einer Verkehrszelle oder zwischen Verkehrszellen statt, je nachdem wo die nächste Fahrzeugfahrt beginnt. Welche Fahrt als nächstes vom AV bedient wird, entscheidet der Umlaufalgorithmus. Idealerweise werden Fahrten innerhalb der gleichen Verkehrszelle mit einem geringen zeitlichen Abstand verknüpft. Der Besetzungsgrad einer Fahrzeugfahrt hat keinen Einfluss auf die Umlaufbildung. Wartezeiten zwischen Fahrzeugfahrten werden durch die Größe des roten Balkens symbolisiert. Der Besetzungsgrad für Ridesharing wird farblich von einer Person (hell grün) bis sechs Personen (dunkel grün) dargestellt, während Fahrten im Modus Carsharing durch die Farbe Orange gekennzeichnet sind. Leerfahrten werden durch rot markierte Wege

hervorgehoben. Je weniger Wartezeit bei geringer Länge von Leerfahrten, desto effektiver wird das Fahrzeug für den Umlauf genutzt. Die Reihenfolge der bedienten Fahrzeugfahrten wird durch Nummerierung sichtbar.

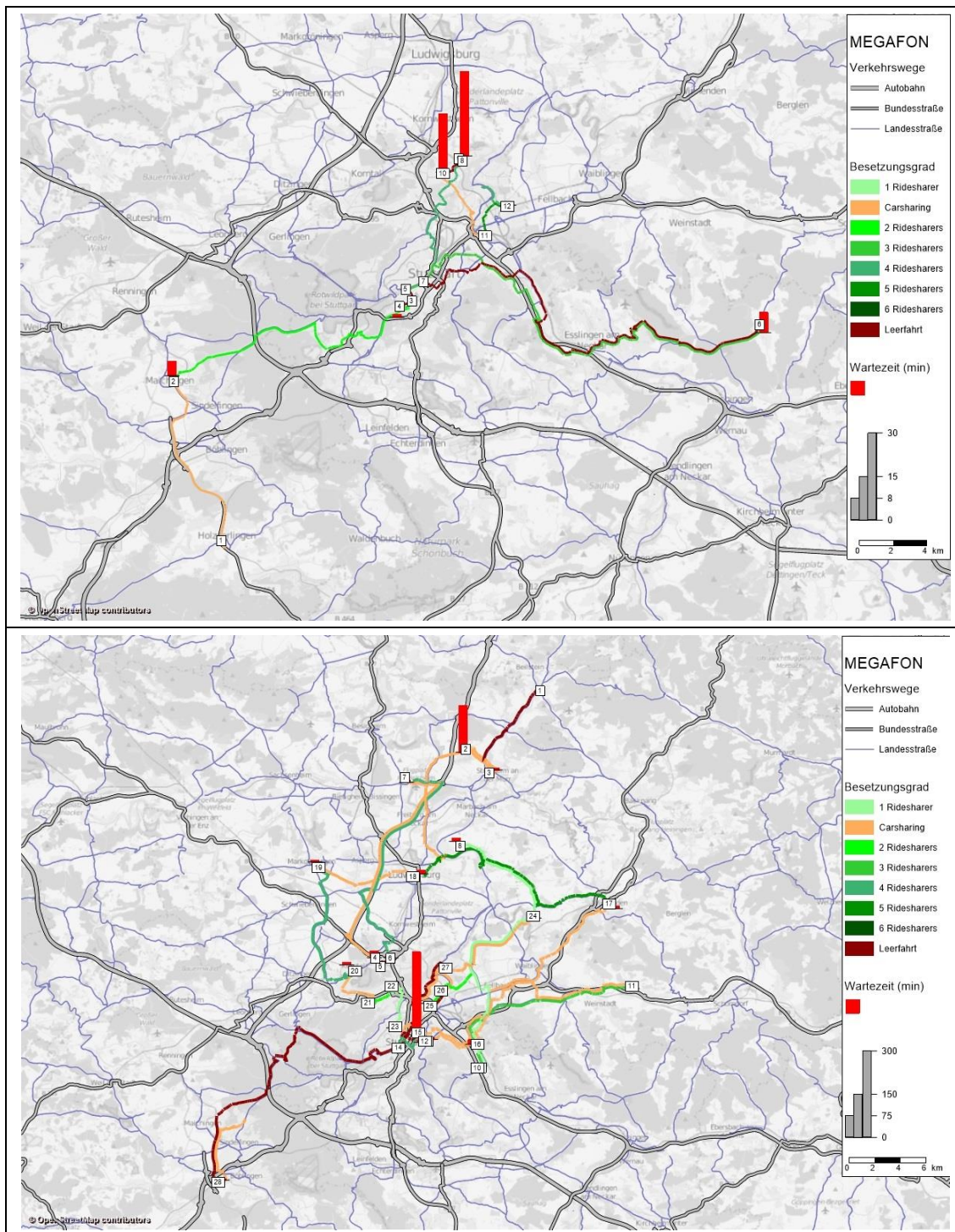


Bild 6: Beispiel von Umlaufbildungen

5 Verkehrsnachfrage

5.1 Verkehrsnachfrage heute

Die vorgestellten Szenarien im Zustand mit AV werden in Bezug zum heutigen Zustand gesetzt, um so die Wirkungen vergleichen zu können. Im Folgenden wird die Verkehrsnachfrage im heutigen Zustand beschrieben.

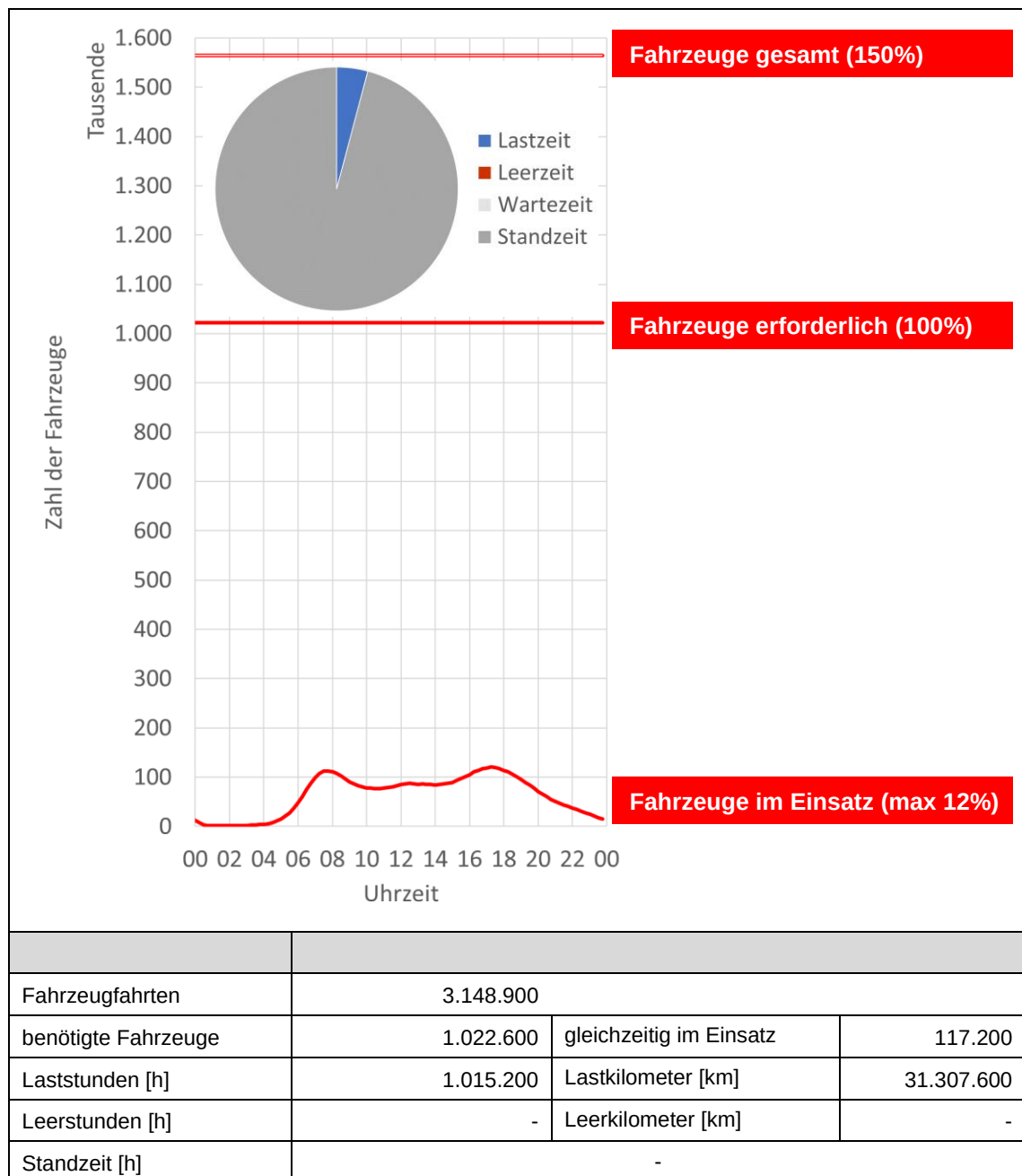


Bild 7: Pkw Fahrzeuge und Verkehrsnachfrage im heutigen Zustand (2010)

Im Untersuchungsgebiet der Region Stuttgart lebten im Jahr 2010 2,66 Mio. Einwohner in 1.25 Mio. Haushalten, die sich auf 1.013 Verkehrszellen verteilen. Hauptverkehrsmittel ist der private Pkw. Jedem Haushalt stehen im Mittel 1,25 Fahrzeuge zur Verfügung, was einem Motorisierungsgrad von rund 590 Pkw pro 1.000 Einwohnern entspricht. Zusammen besitzen die Haushalte 1,56 Mio. Pkw. Von diesen Fahrzeugen werden an einem mittleren Werktag lediglich 1,02 Mio. Fahrzeuge bewegt. In der Hauptverkehrszeit sind maximal 12 % dieser 1,02 Mio. Fahrzeuge gleichzeitig im Einsatz. Diese Pkw werden 60 Minuten pro Tag genutzt. Bezieht man die Einsatzzeit auf alle Pkw reduziert sich die Zeit auf 40 Minuten pro Tag. In Bild 7 sind diese Kenngrößen der Pkw-Nachfrage dargestellt. Die Einsatzzeit stimmt mit Studien aus vergleichbaren Städten überein (MiD 2008).

Bild 8 zeigt die modale Aufteilung der Verkehrsnachfrage. Mehr als 53% der Verkehrsnachfrage entfällt auf den Pkw (Selbstfahrer oder Mitfahrer). 31% der Wege werden zu Fuß oder mit dem Rad zurückgelegt. Der ÖV-Anteil beträgt 16%. Ein Drittel der ÖV Wege werden dabei mit dem Bus, ein weiteres Drittel mit Schienenverkehrsmitteln und das letzte Drittel aus einer Kombination von Bus und Bahn zurückgelegt. Insgesamt werden in der Region pro Tag 7,5 Mio. Wege zurückgelegt, davon 5.1 Mio. Wege mit motorisierten Verkehrsmitteln.

5.2 Verkehrsnachfrage mit AV

Bild 8 zeigt für den heutigen Zustand und den Zustand mit AV die Zahl der Wege und die Anteile, die auf jedes Verkehrsmittel oder auf eine Verkehrsmittelkombination entfallen. Die Aufteilung der Verkehrsnachfrage im Zustand mit AV erfolgt so, dass alle Verkehrsteilnehmer den jeweils schnellsten Modus wählen. Bei dieser Regel werden viele Wege, die heute Bus und Bahn kombinieren komplett auf AV verlagert, da dann Umwegfahrten und Wartezeiten entfallen. Um bei Anwendung dieser Regel im Schienenverkehr die Zahl der Wege etwa gleich zu halten, wurden die zulässigen Kfz-Geschwindigkeiten im Stadtverkehr auf eine Regelgeschwindigkeit von 30 km/h im Verbindungstraßennetz und auf 20 km/h im Erschließungsstraßennetz reduziert. Diese Reduzierung lässt sich mit den Anforderungen an die Sicherheit im Mischverkehr von autonomen Fahrzeugen und nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern begründen. Die Zahl der Wege erhöht sich im Zustand mit AV um etwa 3%, da für die nachfolgenden Schritte der Bündelung und Umlaufbildung die AV-Teilwege als eigenständige Wege behandelt werden.

Während die Zahl der Wege, d.h. die Zahl der Beförderungsfälle im Schienenverkehr gleichbleibt, reduzieren sich die Zahl der Linienbeförderungsfälle um etwa 10% und die Beförderungsleistung um etwa 30%. Ortveränderungen mit Umsteigen verlieren an das AV. Das gilt insbesondere für die S-Bahn. U-Bahn und Expresszüge können die Beförderungsleistung halten. Die Expresszüge bieten eine hohe Beförderungsgeschwindigkeit und die U-Bahn profitiert von den Geschwindigkeitsreduktionen in der Stadt.

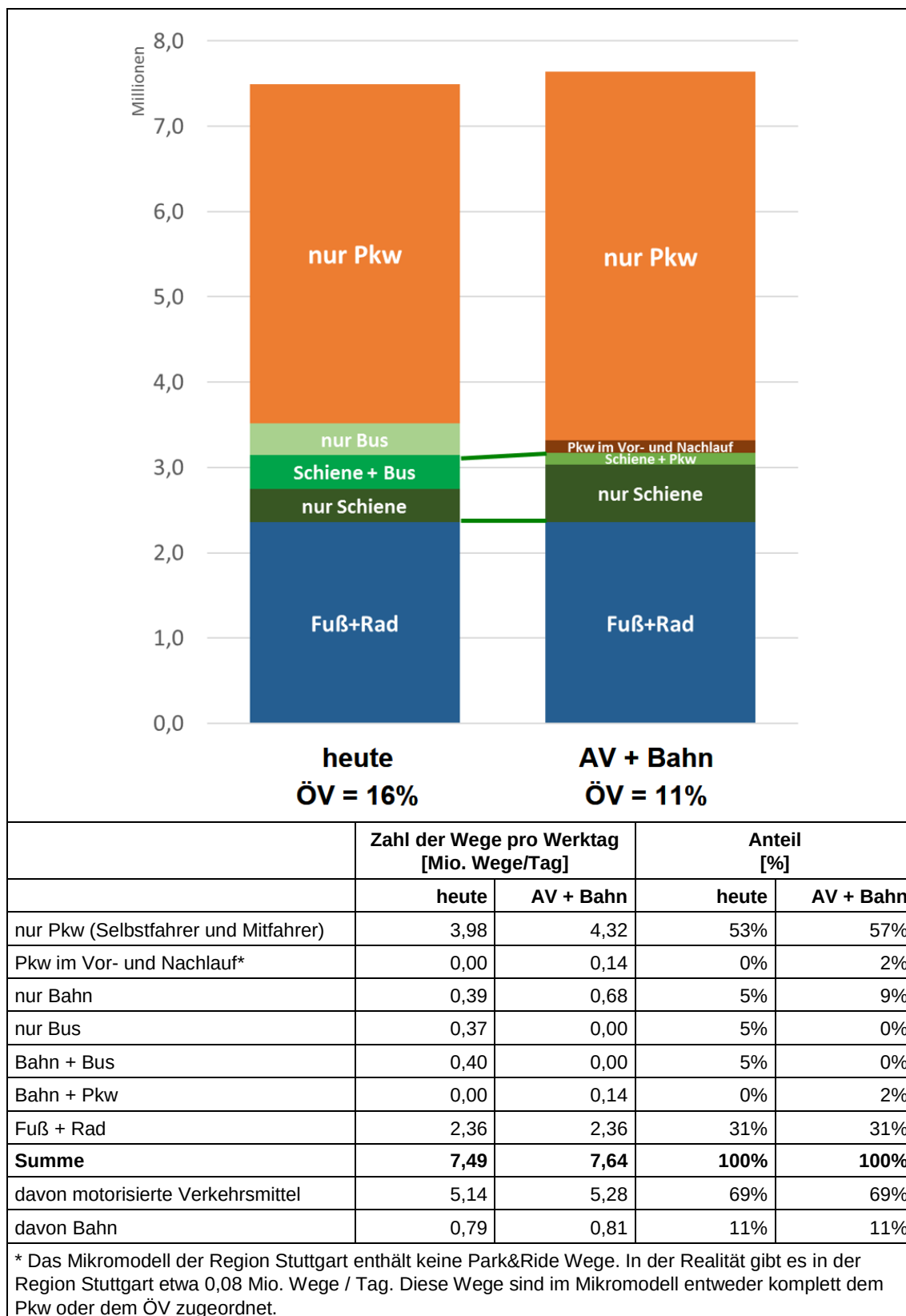


Bild 8: Verkehrsnachfrage (Personenwege) im heutigen Zustand und im Zustand mit autonomen Fahrzeugen

Legt man die Verkehrsnachfrage der Personenwege im Zustand mit AV auf das Verkehrsnetz um, ergibt sich die in Bild 9 dargestellte Struktur:

- Die Verkehrsnachfrage wird durch Wege dominiert, die komplett mit dem AV durchgeführt werden (AV-direkt, orange Farbe). Diese Nachfrage wird in den Szenarien auf die Modi AV-NoSharing, AV-Carsharing und AV-Ridesharing aufgeteilt.
- Die Verkehrsnachfrage mit der Bahn ist auf die Stadt Stuttgart ausgerichtet (Bahn, grüne Farbe). Sie enthält Wege, die komplett mit der Bahn abgewickelt werden und Wege mit einem AV im Vor- oder Nachlauf.
- 2% aller Wege entfallen auf intermodale Wege, die ein AV und die Bahn kombinieren. Die Teilwege mit dem AV sind in der Karte rot dargestellt (AV Vor- und Nachlauf). Es ist erkennbar, dass diese Teilwege auf Ortsveränderungen aus Bereichen ohne Schienenangebot zu Bahnhöfen entfallen. Um diese Teilwege zu erkennen sind sie in der Karte größer skaliert als die Nachfrage mit dem AV-direkt und mit der Bahn.

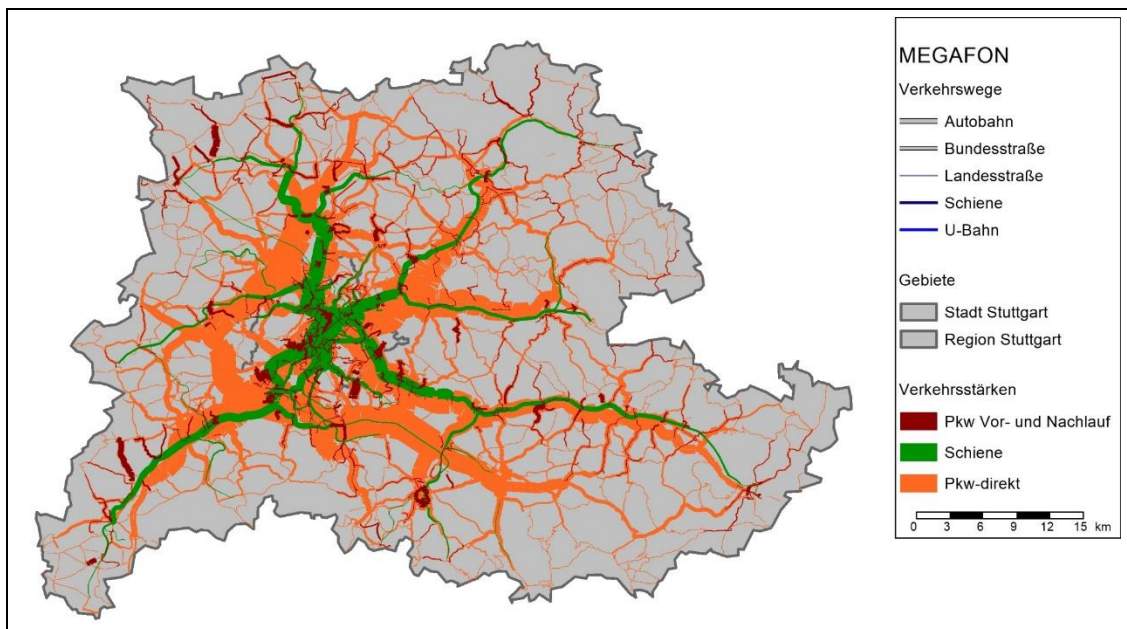


Bild 9: Verkehrsnachfrage der Personenwege im Netz im Zustand mit autonomen Fahrzeugen

6 Ergebnisse im Überblick

Um die Ergebnisse der Szenarien zu quantifizieren, werden folgende Kenngrößen ausgewiesen:

- Änderung Anzahl Pkw (Basisjahr = 100%)
- Änderung Pkw-Kilometer ganztags (Basisjahr = 100%)
- Änderung erforderliche Stellplätze auf privaten und öffentlichen Stellplätzen (Basisjahr = 100%)
- Anteil der Pkw-Kilometer mit einem Besetzungsgrad von 1, 2, 3, 4, 5, 6 Personen
- Anteil der Pkw-Kilometer für Leer- bzw. Umsetzfahrten
- Fahrzeugnutzung pro Tag

6.1 Anzahl der Fahrzeuge

In Bild 10 sind die benötigten Fahrzeuge dargestellt. Differenziert werden sie nach der Nutzung für AV-NoSharing und AV-Sharing (AV-CS, AV-RS). Im oberen Diagramm wird die Fahrzeugzahl auf die Zahl im heutigen Zustand (1,02 Mio. Fahrzeuge) bezogen, d.h. die Bezugsgröße umfasst nur die tatsächlich bewegten Fahrzeuge. Die an einem Tag nicht bewegten Fahrzeuge im heutigen Zustand lassen sich als Reservefahrzeuge für besondere Nachfragesituationen interpretieren, die auch bei geteilten Fahrzeugen in gewissem Umfang auftreten können, z.B. bei Lastspitzen im Urlaubsverkehr. Das untere Diagramm zeigt die Aufteilung der Fahrzeuge auf NoSharing- und Sharing-Fahrzeuge innerhalb eines Szenarios. Die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge sinkt im Szenario mit 100% Ridesharing und Bahn auf bis zu 7% der heutigen Fahrzeugzahl. Um eine gegebene Nachfrage mit AV abzudecken ergibt sich in allen Szenarien in etwa eine Aufteilung von 1,0 : 2,5 : 12,5 für die Modi Ridesharing, Carsharing und NoSharing.

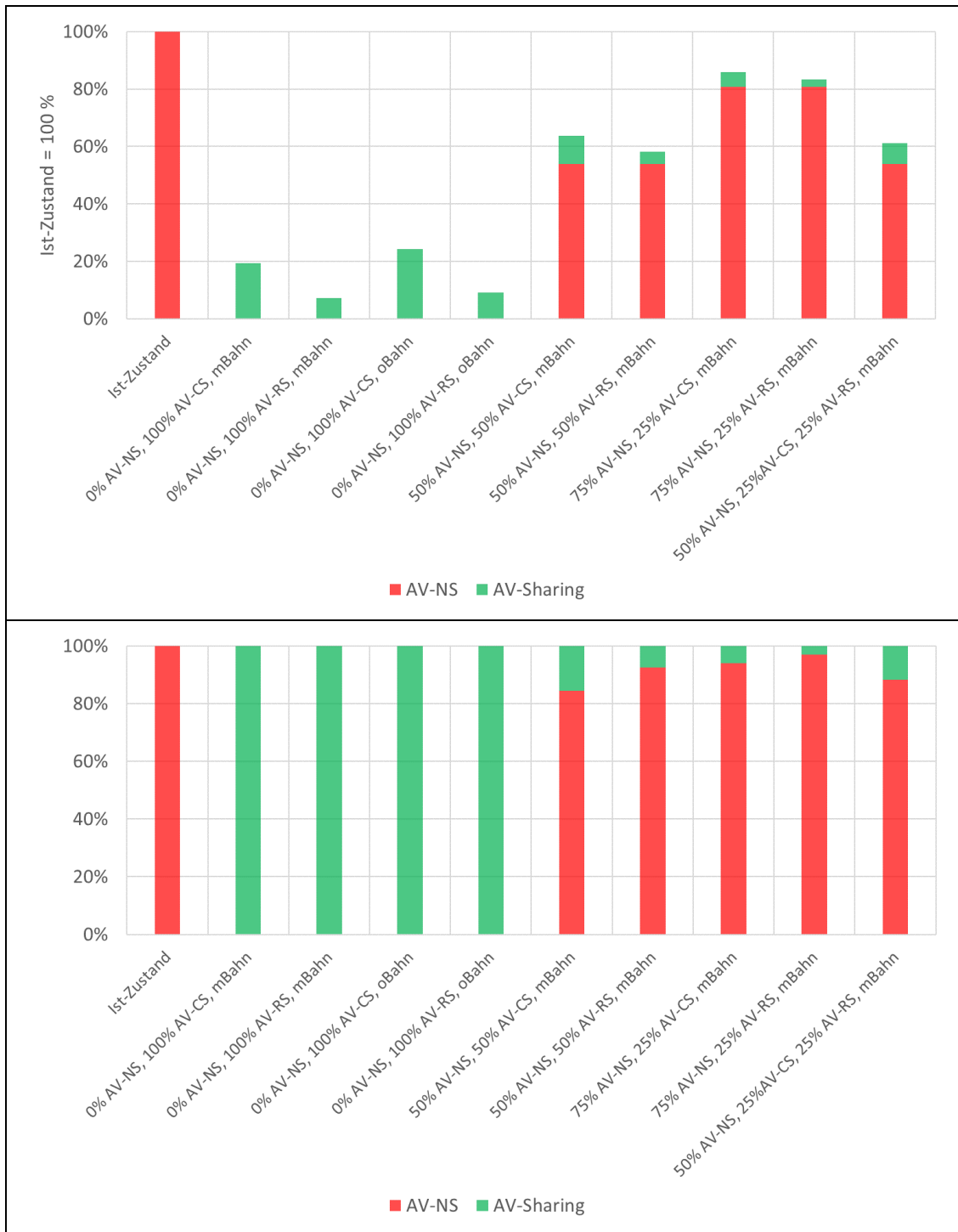


Bild 10: Anzahl AV Fahrzeuge

6.2 Anzahl Fahrzeugfahrten

Bild 11 zeigt die Fahrzeugfahrten differenziert nach den Modi AV-NS, AV-CS und AV-RS. Die Fahrzeugfahrten umfassen Lastfahrten und Leerfahrten. Das obere Diagramm zeigt die Zahl der Fahrten bezogen auf die Fahrzeugfahrten im heutigen Zustand. Das untere Diagramm zeigt die Aufteilung auf die Modi innerhalb eines Szenarios. Die Zahl der Fahrzeugfahrten bezogen auf den heutigen Zustand variiert in den Szenarien deutlich zwischen

- 44% im Szenario 2 (100% Ridesharing und Bahn) und
- 144% im Szenario 3 (100% Carsharing ohne Bahn).

Der Anteil der Leerfahrten an den Gesamtfahrten liegt zwischen 2% und 13%. Bezogen auf die Lastfahrten mit Sharing-Fahrzeugen sind 11% bis 16% Leerfahrten. Der höhere Anteil ergibt sich in den Szenarien 5 bis 9, in denen der Anteil der Sharingfahrten geringer ist.

Szenario	NS	CS	RS	Sharing Leer
0 Ist-Zustand	100%	0%	0%	0%
1 NS000, CS100, RS000, mBahn	0%	89%	0%	11%
2 NS000, CS000, RS100, mBahn	0%	0%	87%	13%
3 NS000, CS100, RS000, oBahn	0%	88%	0%	12%
4 NS000, CS000, RS100, oBahn	0%	0%	87%	13%
5 NS050, CS050, RS000, mBahn	46%	48%	0%	6%
6 NS050, CS000, RS050, mBahn	68%	0%	28%	4%
7 NS075, CS025, RS000, mBahn	71%	26%	0%	3%
8 NS075, CS000, RS025, mBahn	85%	0%	13%	2%
9 NS050, CS025, RS025, mBahn	54%	28%	12%	6%

Tabelle 3: Aufteilung der Fahrzeugfahrten nach Modus und Betriebszustand

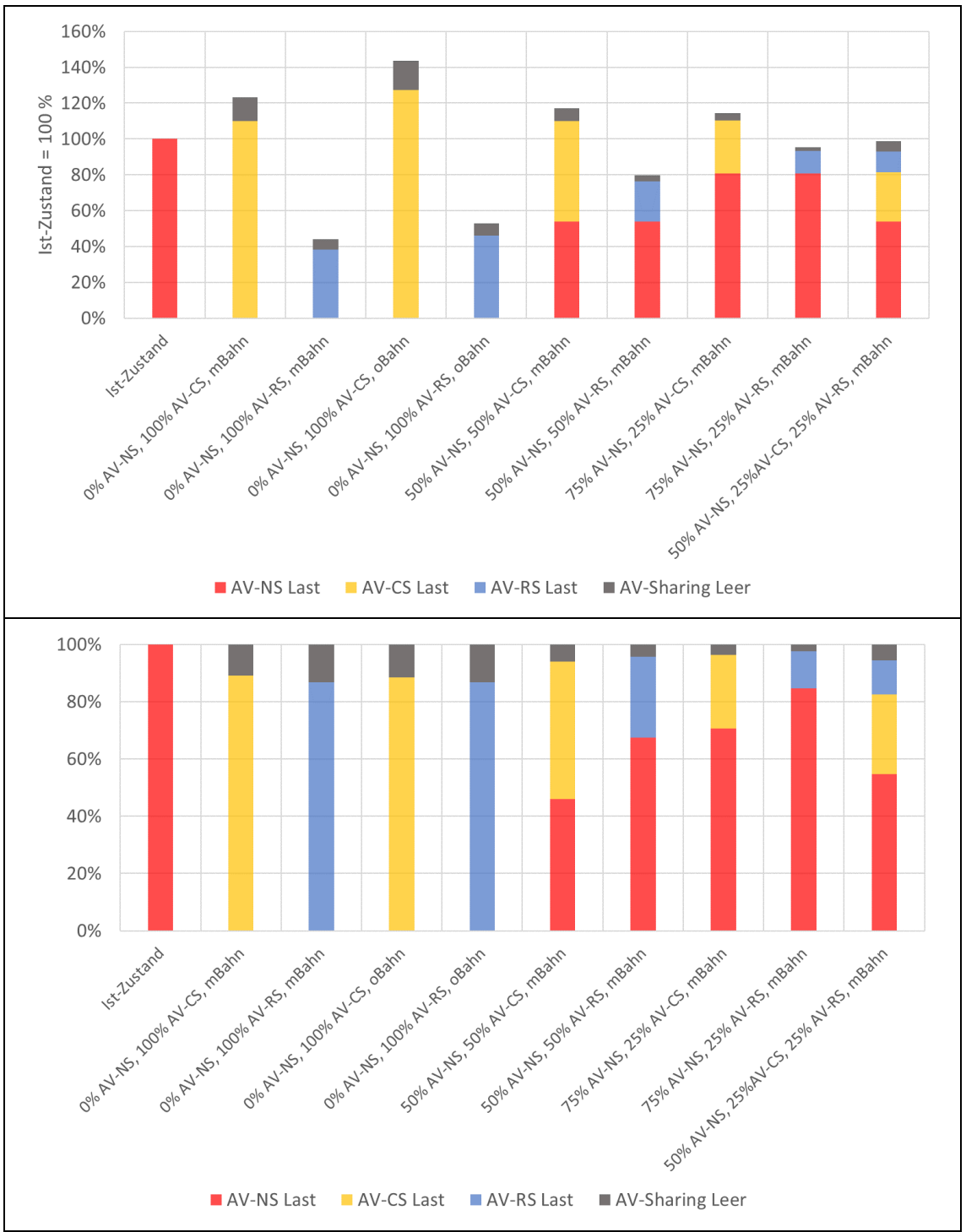


Bild 11: Anzahl der Fahrzeugfahrten differenziert nach Modus und Last- bzw. Leerfahrten

6.3 Fahrzeugkilometer

Die Fahrzeugkilometer berücksichtigen nicht nur die Zahl der Fahrten, sondern zusätzlich die Fahrtweite. Sie sind deshalb aus verkehrlicher Sicht aussagekräftiger als die Zahl der Fahrzeugfahrten. In Bild 12 sind die Fahrzeugkilometer differenziert nach den Modi AV-NS und AV-Sharing dargestellt. Bei den Sharing-Fahrzeugen sind Lastfahrten und Leerfahrten differenziert. Das obere Diagramm zeigt die Fahrzeugkilometer bezogen auf die Fahrzeugkilometer im heutigen Zustand. Das untere Diagramm zeigt die Aufteilung auf die Modi innerhalb eines Szenarios. Bezogen auf den heutigen Zustand liegen die Fahrzeugkilometer in den Szenarien zwischen

- 64% im Szenario 2 (100% Ridesharing und Bahn) und
- 139% im Szenario 3 (100% Carsharing ohne Bahn).

Zur Einsparung von Fahrzeugkilometern kommt es nur in Szenarien, die Ridesharing-Anteile als Angebot unterstellen. Reines AV-Carsharing führt nicht zu einer Verkehrsentslastung.

Der Anteil der Leerkilometer an der gesamten Fahrleistung (inkl. NoSharing) liegt zwischen 1% und 6%. Bezogen auf die Lastfahrten mit Sharingfahrzeugen entfallen 4% bis 9% der Fahrleistung auf Leerfahrten. Der Anteil der Leerkilometer ist niedriger als der Anteil der Leerfahrten, da die mittlere Fahrtweite der Leerfahrten deutlich kleiner ist als die Fahrtweite der Lastfahrten.

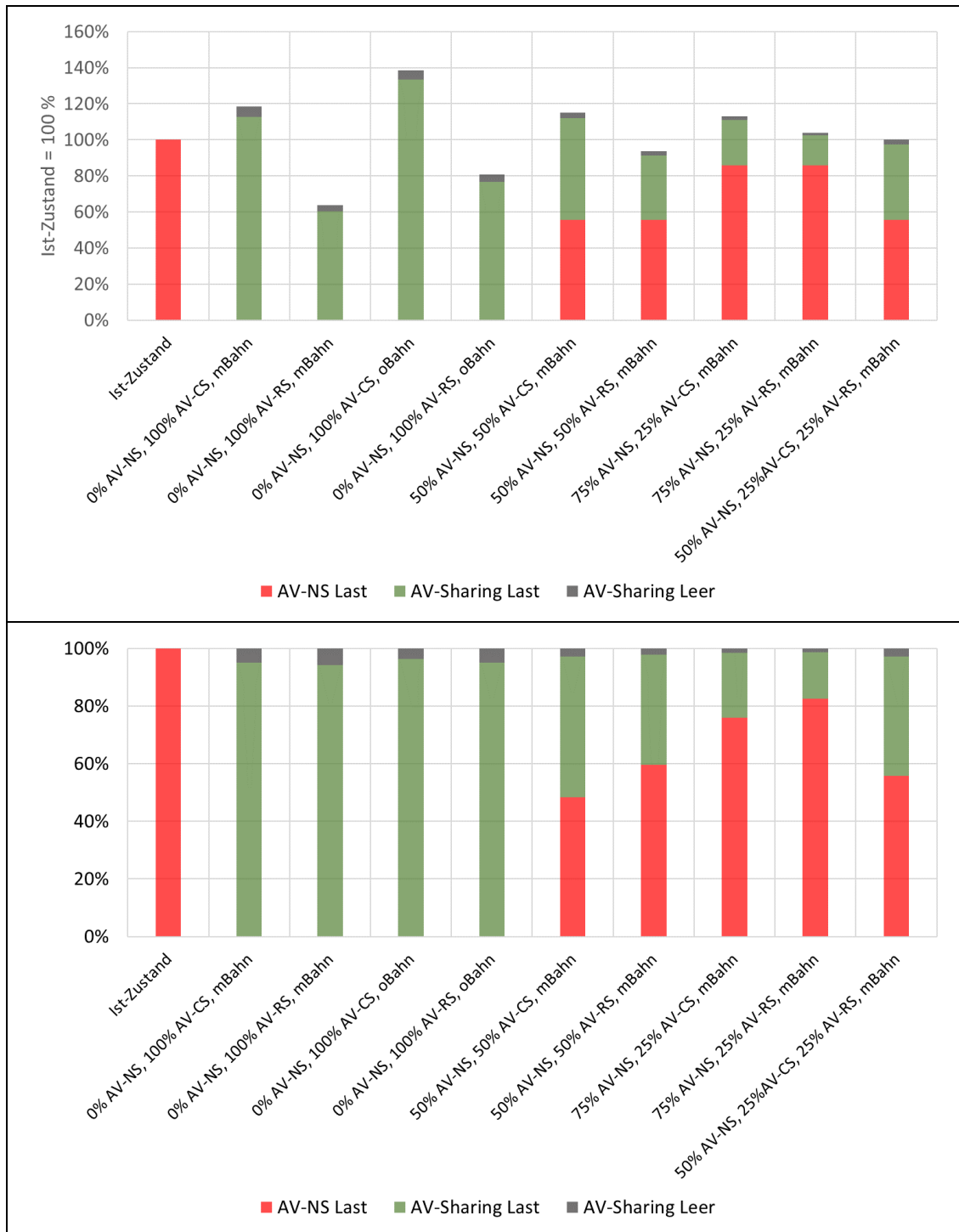


Bild 12: Fahrzeugkilometer differenziert nach Modus und Last- bzw. Leerfahrten

6.4 Fahrzeugkilometer nach Besetzungsgrad

In Bild 13 sind die Fahrzeugkilometer differenziert nach dem Besetzungsgrad aufgeschlüsselt. Bei den zurückgelegten Fahrzeugkilometern handelt es sich immer um Lastkilometer. Der Besetzungsgrad beträgt im Falle von AV-CS durchschnittlich 1,3 Personen, während im Fall AV-RS der Besetzungsgrad von einer bis sechs Personen schwankt. Das obere Diagramm zeigt die Fahrzeugkilometer bezogen auf die Fahrzeugkilometer im heutigen Zustand. Das untere Diagramm zeigt die Aufteilung auf die Modi innerhalb eines Szenarios.

In Bild 14 sind die Besetzungsgrade für den Modus AV-RS differenziert dargestellt. Das Bild zeigt die Anteile der Lastkilometer, die auf Fahrzeugfahrten mit der Besetzung 1, 2, 3, 4, 5 und 6 entfallen. Als Besetzungsgrad einer Fahrt wird bei dieser Darstellung immer der maximale Besetzungsgrad herangezogen. Bei Fahrten mit einem Ridesharing-Fahrzeug ändert sich, wie bei einem ÖV-Fahrzeug, die Besetzung im Laufe der Fahrt. Ausgangspunkt einer solchen Fahrt ist ein Fahrtwunsch mit einer langen Fahrtweite. Entlang der Fahrtroute dieses Fahrtwunsches werden dann passende Fahrtwünsche mit einer kürzeren Fahrtweite eingesammelt. Der maximale und der mittlere Besetzungsgrad unterscheiden sich deshalb bei Fahrten mit mehr als einem Fahrgast. Die Auswertung des maximalen Besetzungsgrades ergibt eine U-förmige Kurve, d.h. der Besetzungsgrad 1 und der Besetzungsgrad 6 treten besonders häufig auf. Der in Bild 14 ausgewiesene mittlere Besetzungsgrad beim Ridesharing von 2,0 bis 2,4 ergibt sich aus dem Quotienten von Personenkilometern und Fahrzeugkilometern.

Die detaillierten Auswertungen je Szenario (Bild 20, Bild 22, Bild 24, Bild 26 und Bild 27) zeigen, dass niedrige Besetzungsgrade besonders häufig in den Tagesrandzeiten auftreten. In der Hauptverkehrszeit können erwartungsgemäß mehr Fahrten gebündelt werden. Der Besetzungsgrad steigt mit dem Anteil der Ridesharing-Fahrten, da mit steigender Nachfrage Fahrgäste aus einem größeren Nachfragepool gebündelt werden können.

Das hohe Auftreten des Besetzungsgrades 6 gibt einen Hinweis auf die Gestaltung der Shuttle-Fahrzeuge, die auch bei vollausgelastetem Fahrzeug kurze Fahrgastwechselzeiten und genug Privatsphäre ermöglichen müssen. Es weist außerdem darauf hin, dass auf manchen Relationen größere Fahrzeuge sinnvoll sein könnten.

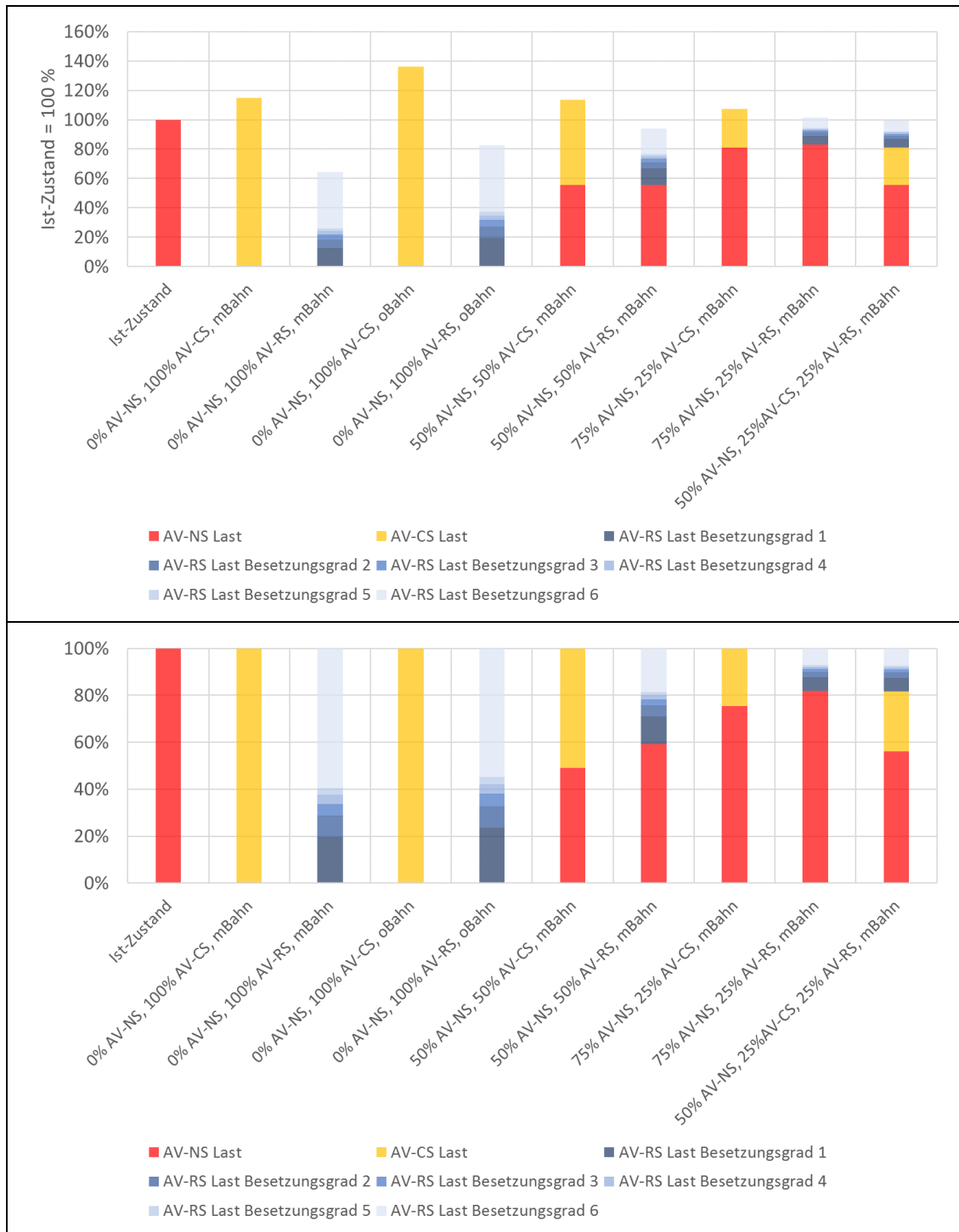


Bild 13: Anteil der Fahrzeugkilometer differenziert nach Besetzungsgrad

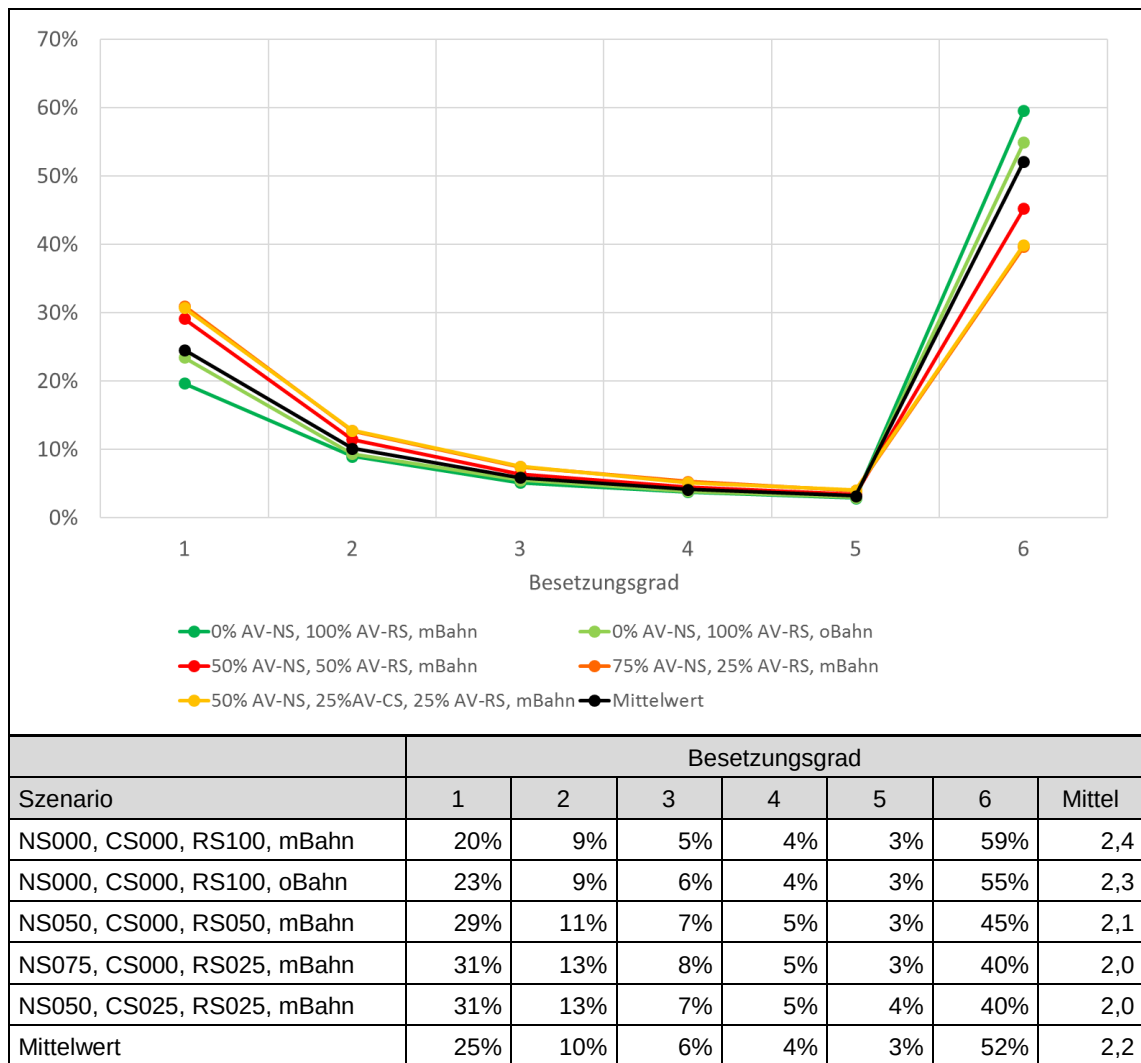


Bild 14: Besetzungsgrad der Fahrzeuge im Modus AV-Ridesharing

6.5 Fahrzeugnutzung pro Tag

Die Fahrzeugnutzung über 24 Stunden wird in Bild 15 (oben) in Bezug zur gesamten Nutzungszeit aller eingesetzten Fahrzeuge gesetzt. Dabei werden alle AV-Fahrzeuge inklusive AV-NS, AV-CS, AV-RS betrachtet. In Bild 15 (unten) werden lediglich die Sharing Fahrzeuge (AV-CS, AV-RS) berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine Änderung der Nutzungszeiten für die Szenarien 5-9.

Ein Vergleich der Fahrzeugnutzung für die Modi AV-NS, AV-CS und AV-RS ergibt folgende Mittelwerte pro Fahrzeug:

- Fahrzeuge im Modus AV-NS sind im Schnitt 1,0 Stunden im Einsatz.
- Fahrzeuge im Modus AV-CS sind im Schnitt 5,1 Stunden für Lastfahrten und 1,5 Stunden für Leerfahrten im Einsatz.
- Fahrzeuge im Modus AV-RS sind im Schnitt 7,0 Stunden für Lastfahrten und 1,4 Stunden für Leerfahrten im Einsatz.

Der Vergleich zeigt, dass Fahrzeuge im Modus AV-RS am effizientesten eingesetzt werden können. Die Effizienz steigt aber sowohl bei Carsharing als auch bei Ridesharing mit steigender Nachfrage.

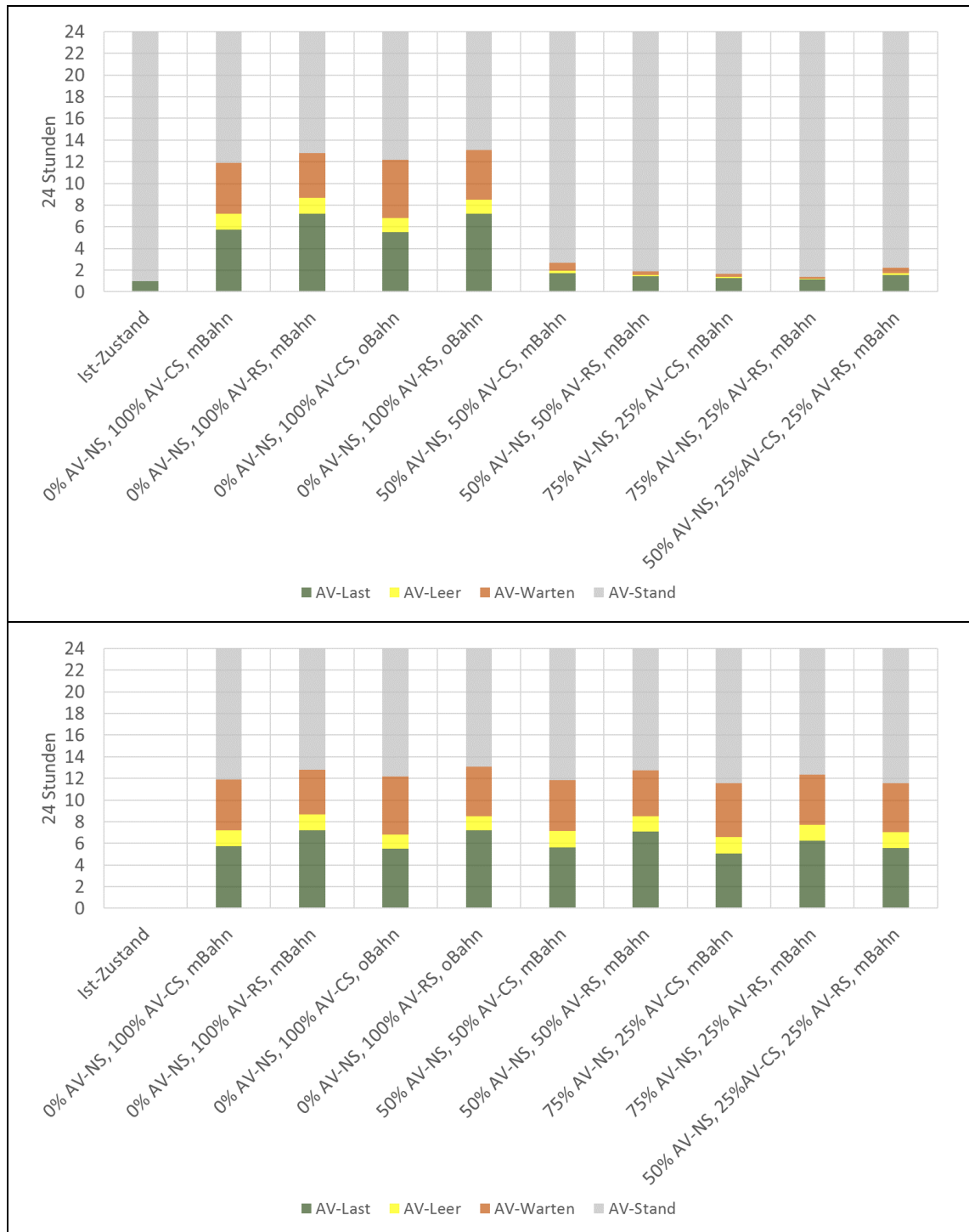


Bild 15: Fahrzeugnutzung pro Tag: Bezugsgröße (oben) alle AV, Bezugsgröße (unten) AV-Sharing

6.6 Erforderliche Stellplätze

In Bild 16 sind die erforderlichen Stellplätze für den Untersuchungsraum dargestellt. Die Werte entsprechen in etwa den Werten der Zahl der erforderlichen Fahrzeuge. Das erklärt sich damit, dass es immer Zeiten gibt, in denen viele Fahrzeuge gleichzeitig stehen.

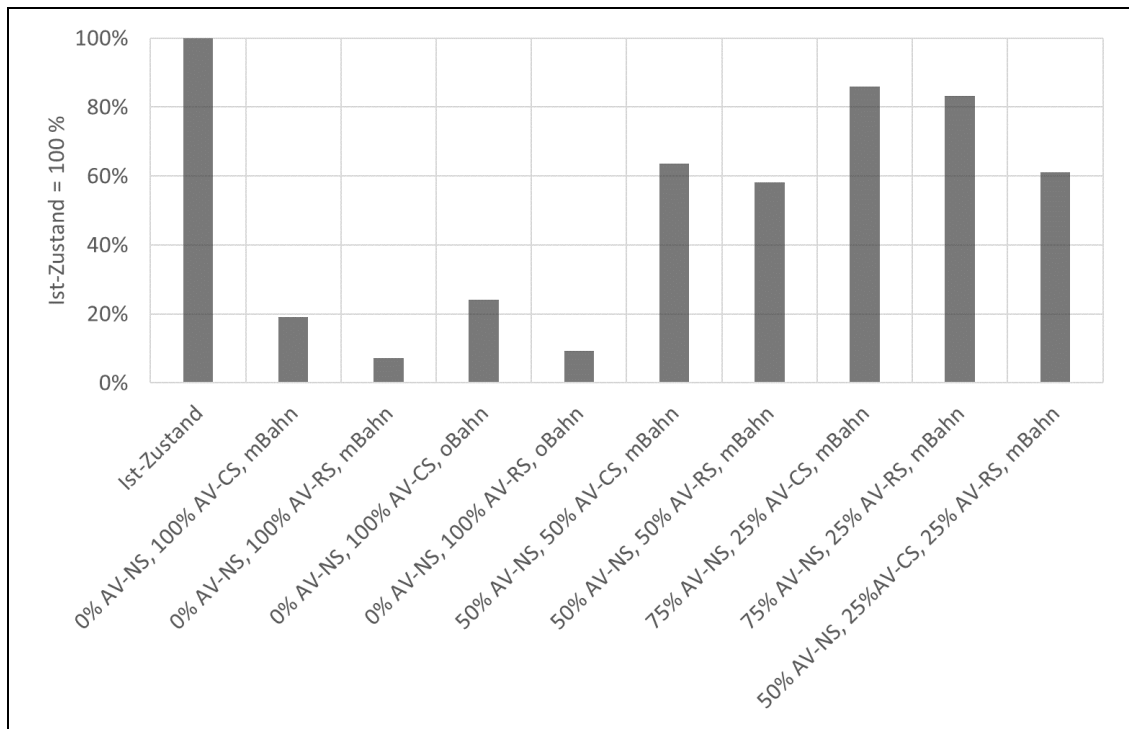


Bild 16: Anzahl erforderlicher Stellplätze

Die räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge ist sehr ähnlich zwischen den einzelnen Szenarien. Beispielhaft kann die Parkverteilung für das erste Szenario Bild 17 (oben) und für das zweite Szenario Bild 17 (unten) entnommen werden. Die Karten zeigen jeweils die Zahl der parkenden Fahrzeuge im Ist-Zustand und im Szenario als Säulendiagramm. Dargestellt ist jeweils ein Zeitraum mit vielen parkenden Fahrzeugen (Nachts 3:00 Uhr) und mit wenigen parkenden Fahrzeugen (morgendliche Hauptverkehrszeit 7:00 Uhr). Die Karten für die restlichen Szenarien zur Parkverteilung ist im Anhang unter 12.1 und 12.2 zu finden.

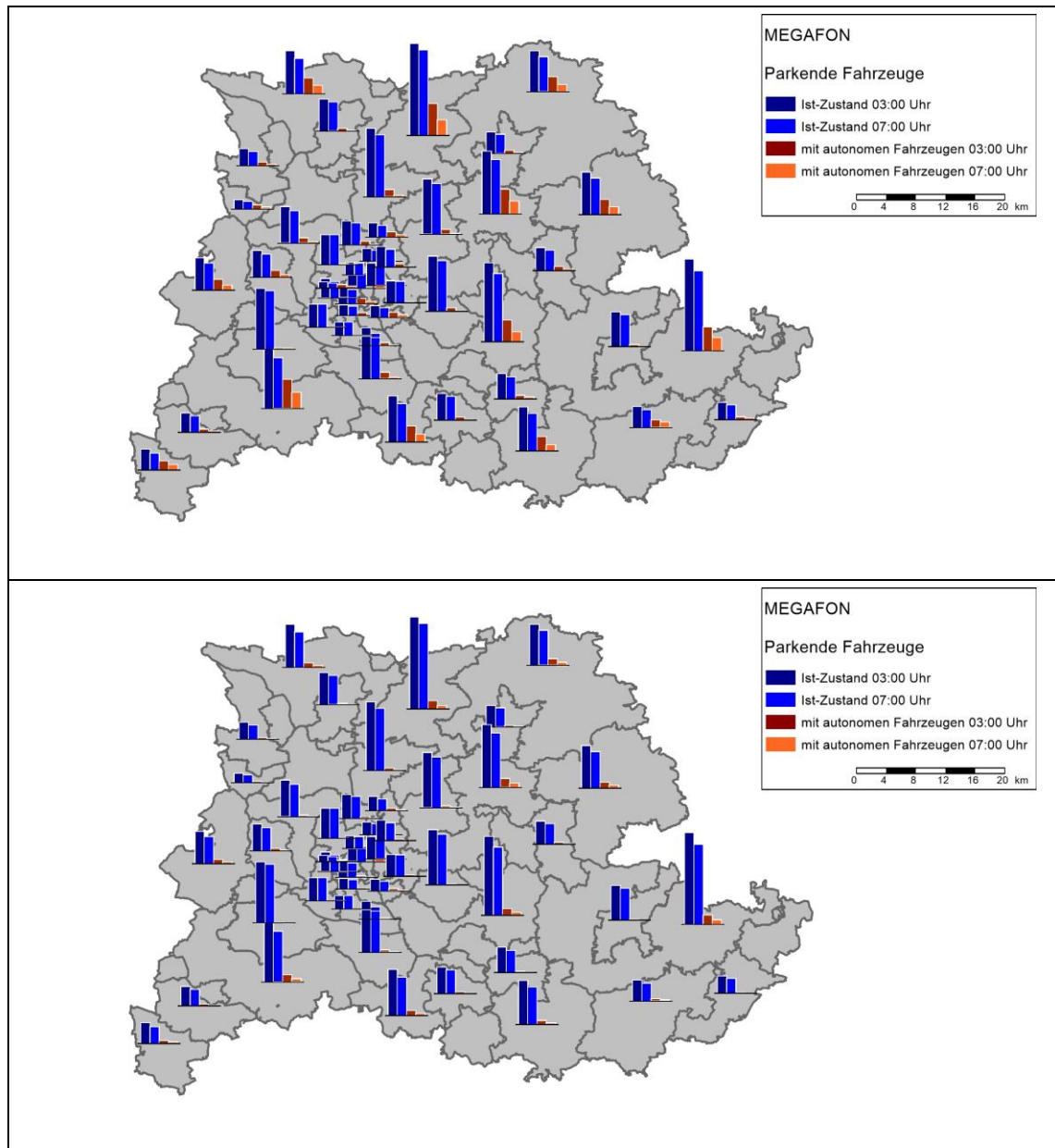


Bild 17: Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge für Szenario 1 (oben) und für Szenario 2 (unten) im Vergleich zum Ist-Zustand für zwei Tageszeiten (Nachts, morgendliche Hauptverkehrszeit)

6.7 Energieverbrauch

Der zukünftige Energieverbrauch der Pkw hängt von der Entwicklung der Antriebstechnologie und der Fahrzeuggröße ab. Für eine Abschätzung des Endenergieverbrauchs werden folgende Annahmen getroffen:

- Alle Pkw (AV-NS, AV-CS und AV-RS) nutzen die gleiche Antriebstechnologie. Bei gleicher Fahrzeuggröße würden sie die gleiche Energiemenge pro Kilometer benötigen.
- Fahrzeuge des Modus AV-NS, die nur privat genutzt werden, werden als Bezugsfahrzeuggröße auf den Wert 20 kWh/100km gesetzt.
- Bei Fahrzeugen des Modus AV-CS wird angenommen, dass den Nutzern eine Fahrzeugflotte mit Fahrzeugen unterschiedlicher Größe angeboten wird, aus der die Nutzer auswählen können. Im Mittel werden die Fahrzeuge im Stadt- und Regionalverkehr kleiner sein, als privat genutzte Fahrzeuge. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge 20% weniger Energie verbrauchen.
- Fahrzeuge des Modus AV-RS können 6 Personen befördern. Sie werden deshalb etwas größer sein, als privat genutzte Fahrzeuge. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge 10% mehr Energie verbrauchen.
- Für Busse wird angenommen, dass sie, ähnlich wie heute, etwa 4- bis 5-mal so viel Energie verbrauchen, wie ein Personenwagen.
- Für die Bahnen wird ein Verbrauch von 1.000 kWh/100km angenommen. Im U-Bahnverkehr liegt dieser Wert niedriger (ca. 500 kWh/100km), im S-Bahnverkehr höher (ca. 1.500 kWh/100km).

Mit diesen Annahmen ergibt sich der in Bild 18 dargestellte Endenergieverbrauch. Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Carsharing ist dann energieeffizienter als private Fahrzeuge, wenn kleinere Fahrzeuge eingesetzt werden (Vergleich S0 und S1).
- Ein gut ausgelastetes Ridesharing kann energieeffizienter als der SPNV sein (Vergleich S2 und S4). Beide Szenarien weisen den geringsten Endenergieverbrauch auf.

Die dargestellten Ergebnisse werden allerdings stark von den Annahmen zu den Verhältniswerten der Verbräuche Pkw / Schiene beeinflusst.

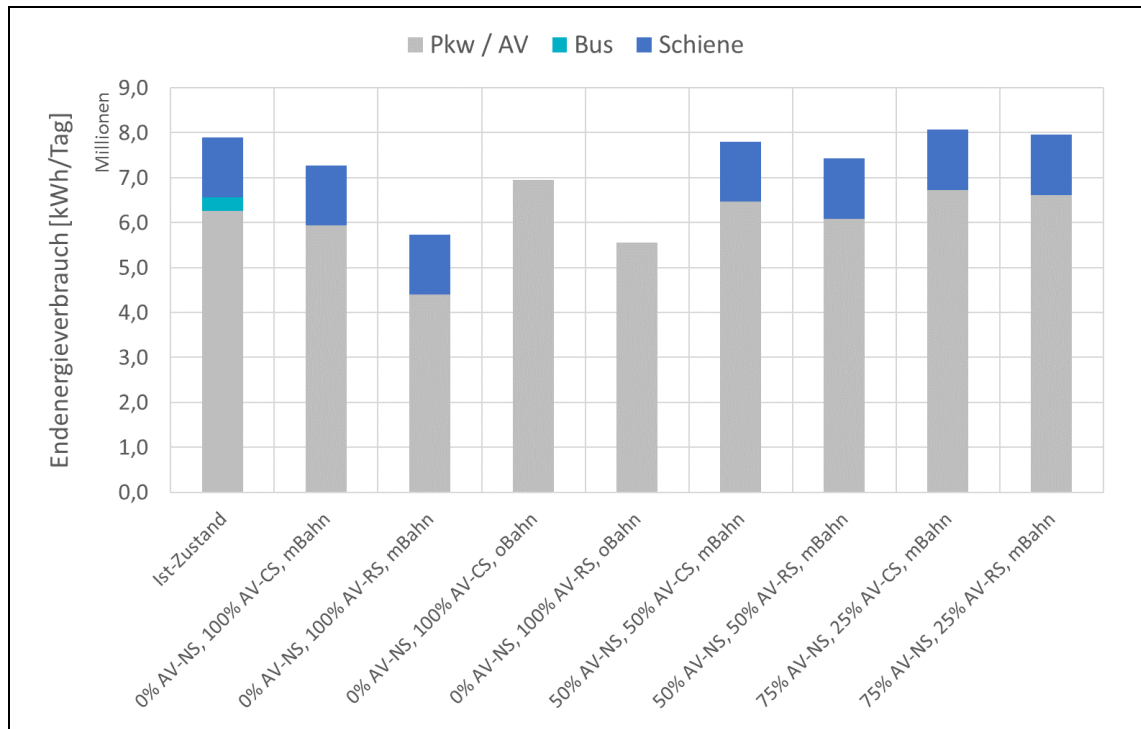


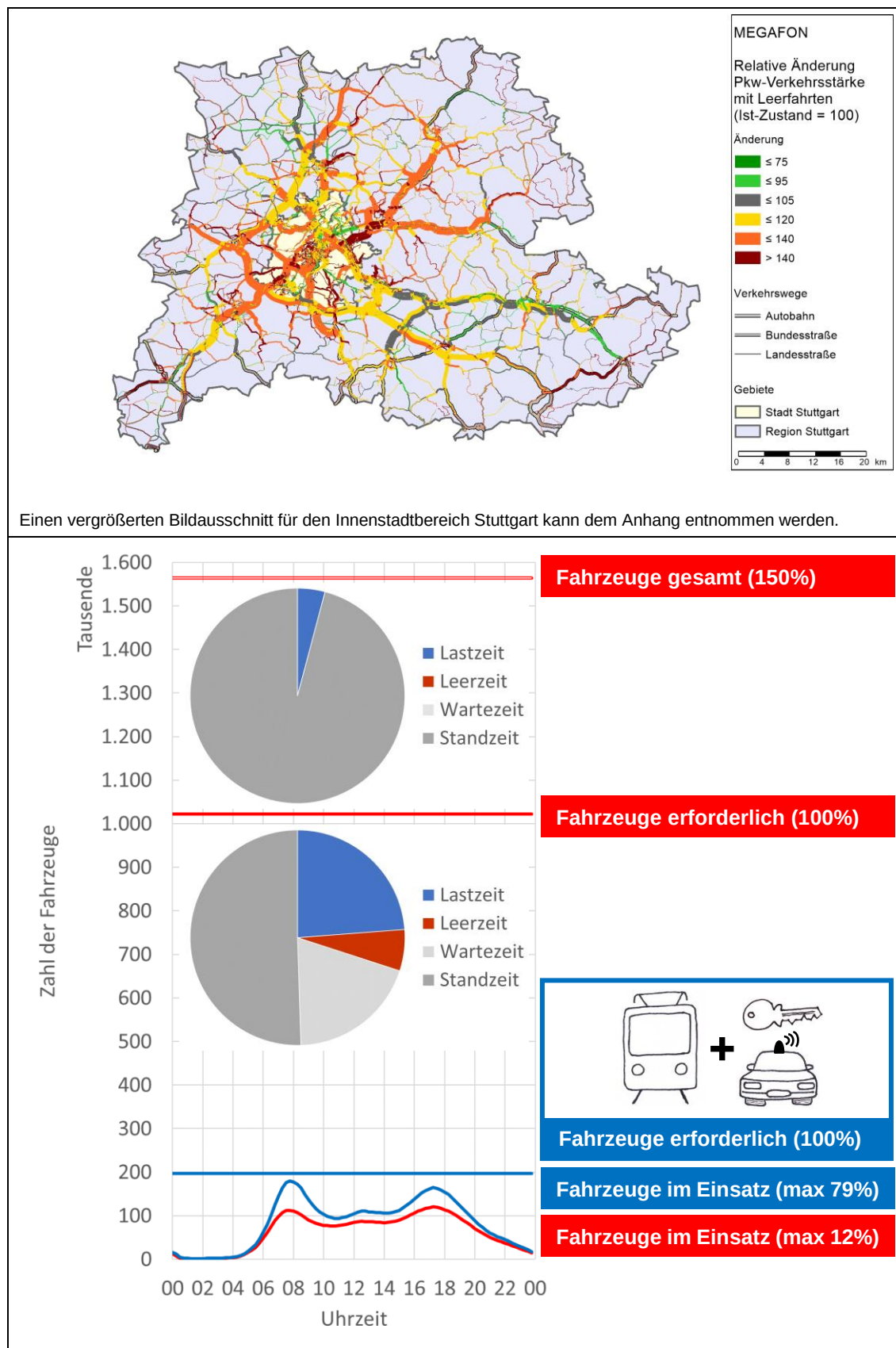
Bild 18: Endenergieverbrauch

7 Ergebnisse je Szenario

Im Folgenden werden die Ergebnisse für jedes Szenario in Form eines Steckbriefes vorgestellt. Jeder Steckbrief enthält die folgenden Daten:

- Karte mit den relativen Änderungen der Verkehrsstärke. Bei den Änderungen werden die Klassen ≤ 75 , 75-95, 95-105, 105-120, 120-140 und > 140 unterschieden.
 - Die Klassen < 95 sind grün dargestellt. Hier gibt es Entlastungen.
 - Die Klasse 95 bis 105 ist grau dargestellt. Hier werden die Änderungen klein sein.
 - Die Klassen > 105 sind gelb oder rot dargestellt. Hier gibt es Zunahmen. Ausgehend davon, dass autonome Fahrzeuge im Stadtverkehr die Straßenkapazität um bis zu 40% erhöhen (Friedrich, 2015), verschlechtert sich der Verkehrsfluss auf den Strecken, die in die Klassen > 140 fallen.
- Ganglinien der erforderlichen Fahrzeugzahl:
 - Die obere horizontale rote Linie gibt die gesamte Zahl der Pkw in der Region Stuttgart im Ist-Zustand an (1,56 Mio.).
 - Die zweite horizontale rote Linie gibt die Zahl der Pkw in der Region Stuttgart an (1,02 Mio.), die im Ist-Zustand an einem Tag bewegt werden.
 - Die rote Ganglinie zeigt den zeitlichen Verlauf des Einsatzes dieser 1,02 Mio. Fahrzeuge.
 - Die blaue horizontale Linie gibt die Zahl der erforderlichen Sharingfahrzeuge (CS bzw. RS) im jeweiligen Szenario an.
 - Die blaue Ganglinie zeigt den zeitlichen Verlauf des Einsatzes des Sharingfahrzeuge (CS bzw. RS) im jeweiligen Szenario an.
 - Das obere Tortendiagramm zeigt die Anteile der Last- und Leerzeit der Pkw im Ist-Zustand.
 - Das untere Tortendiagramm zeigt die Anteile der Last-, Leer-, Warte- und Standzeit aller Fahrzeuge (NS, CS, RS) im jeweiligen Szenario.
- Tabelle mit den Kenngrößen zur Zahl der erforderlichen Fahrzeuge, den Lastfahrten und den Leerfahrten
- Ganglinien der Fahrzeugnutzung differenziert nach den Betriebszuständen Lastfahrt, Leerfahrt und Warten.
- Ganglinien des Besetzungsgrads.

7.1 Szenario 1: 0% AV-NS, 100% AV-CS mit Bahn



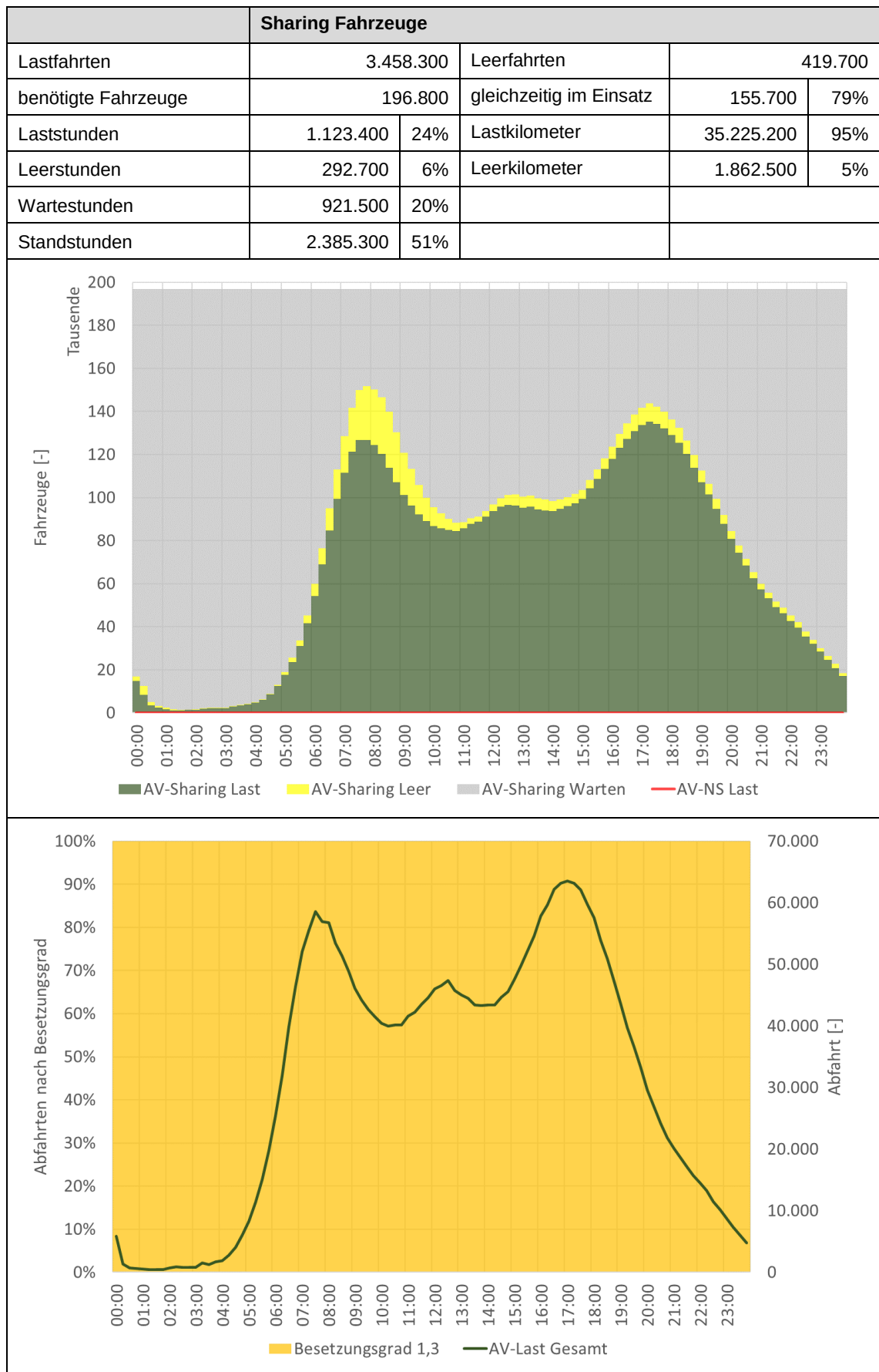
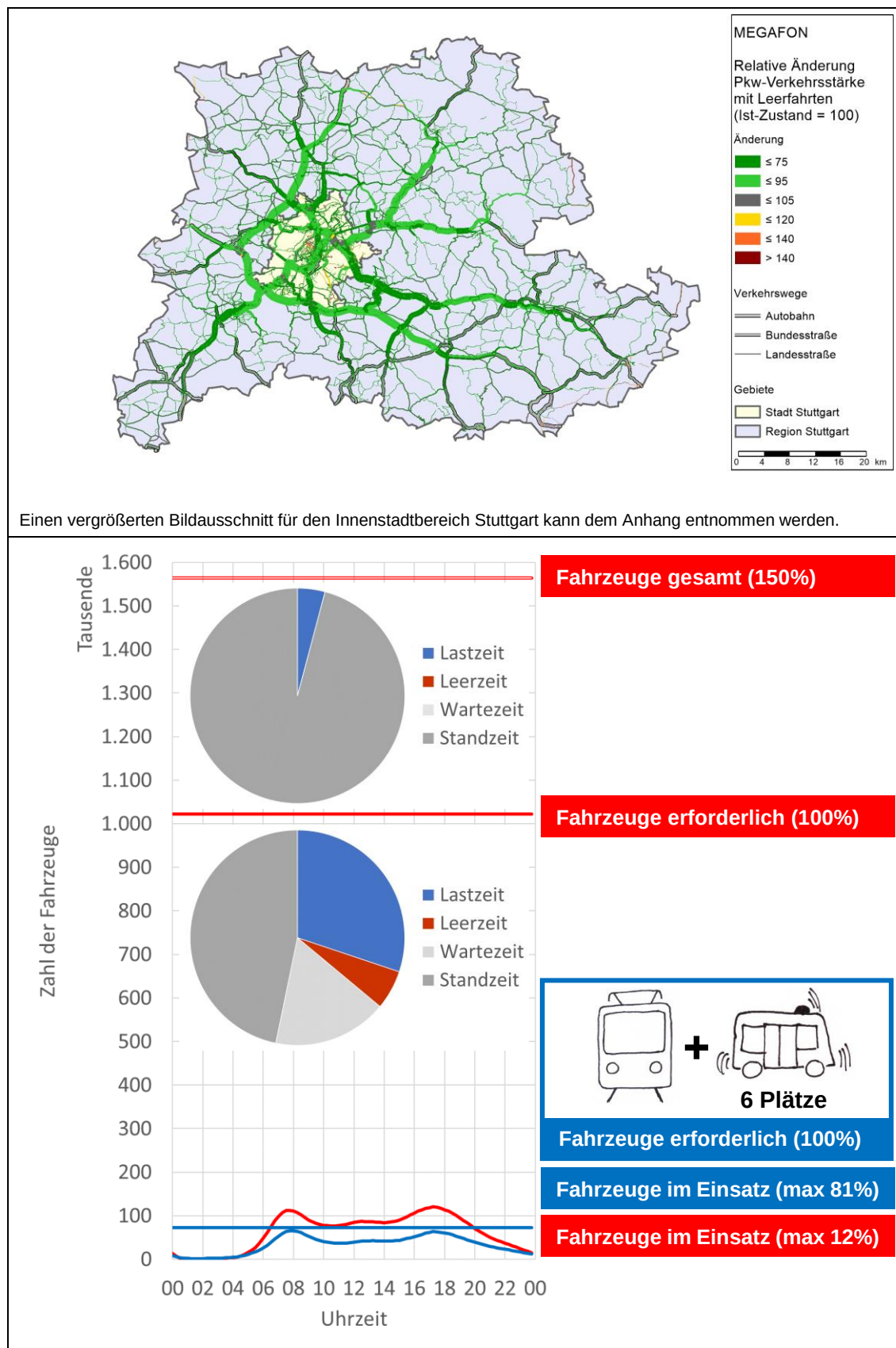


Bild 19: Steckbrief Szenario 1

7.2 Szenario 2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn



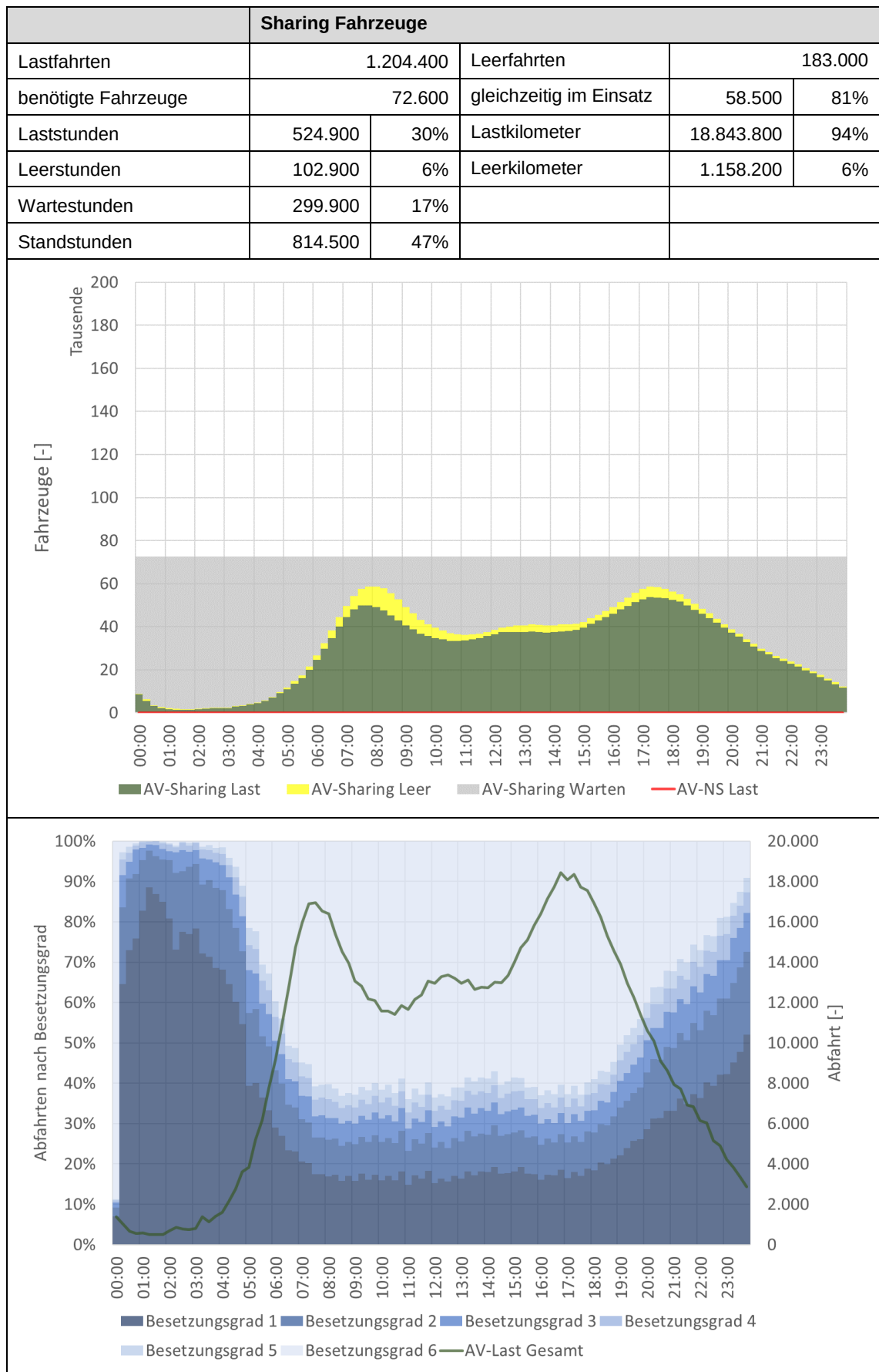
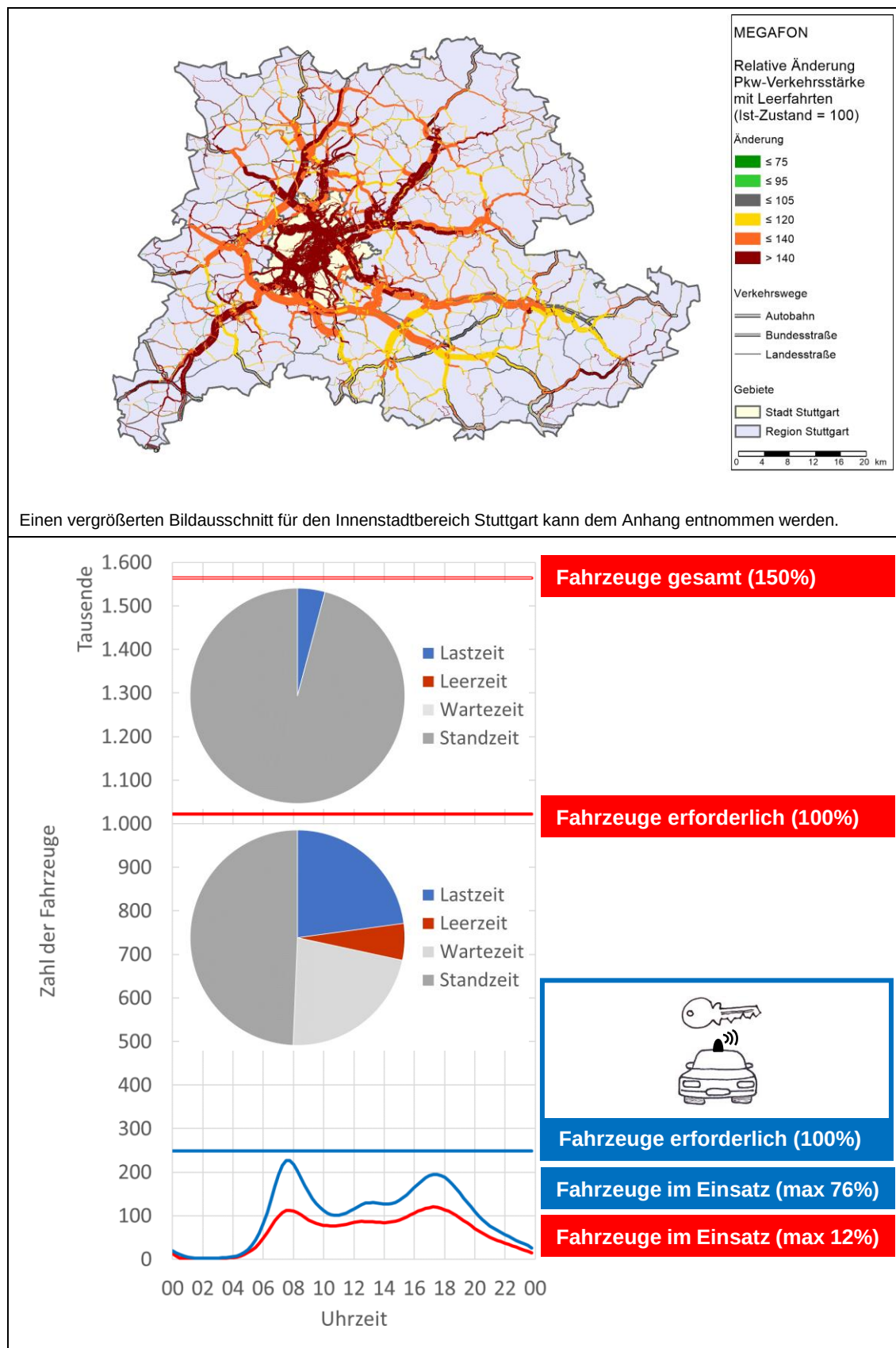


Bild 20: Steckbrief Szenario 2

7.3 Szenario 3: 0% AV-NS, 100% AV-CS ohne Bahn



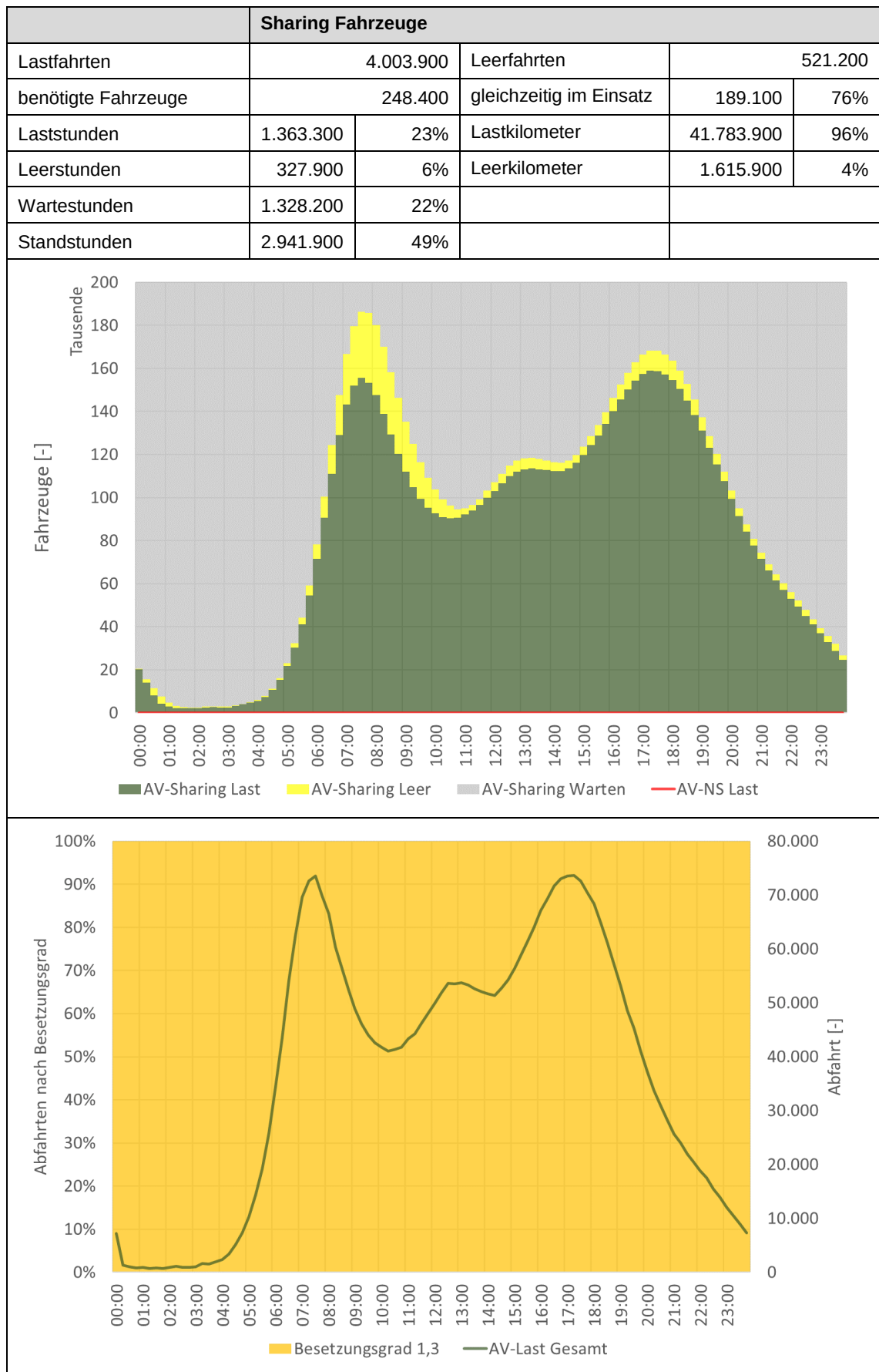
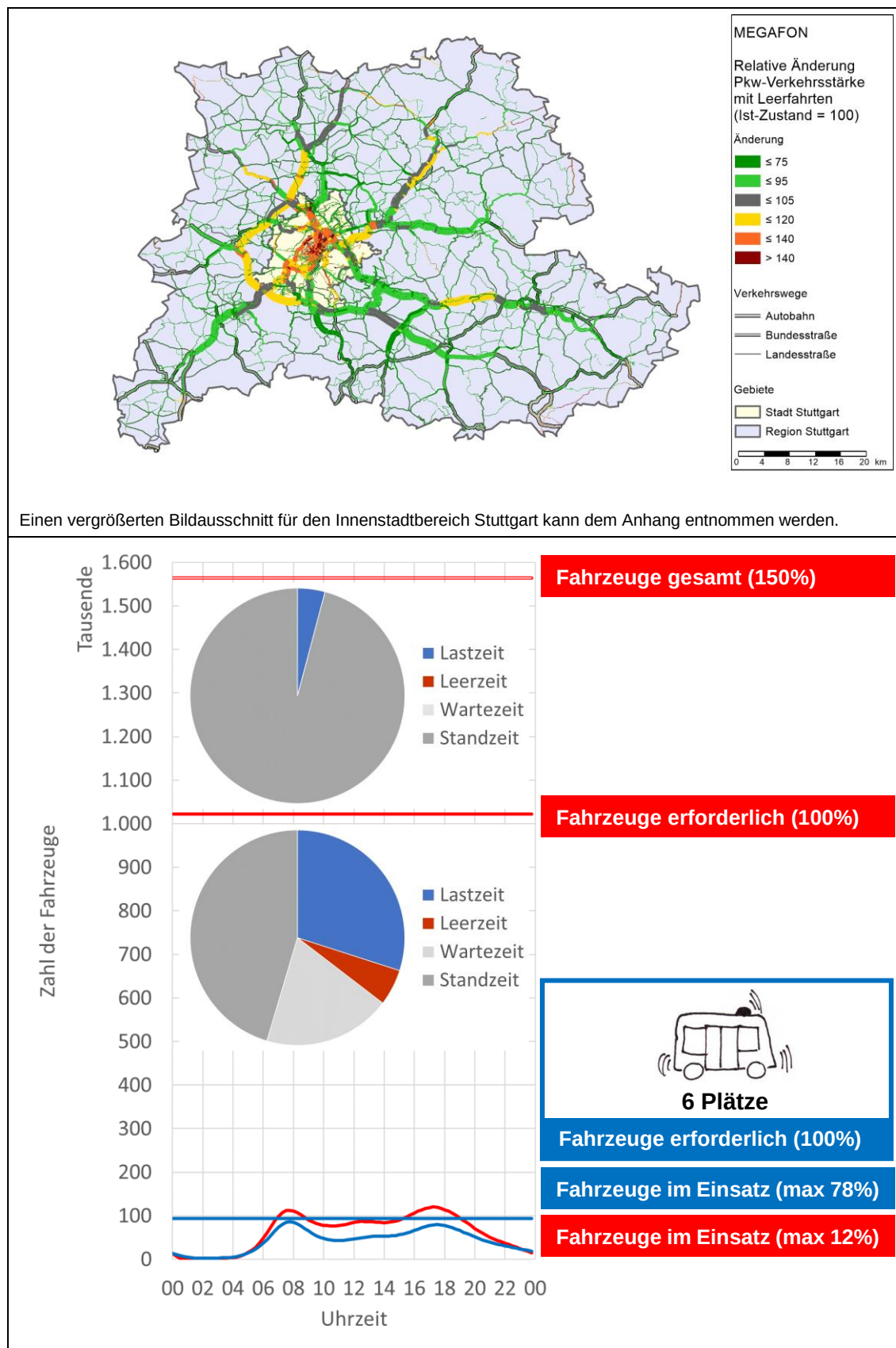


Bild 21: Steckbrief Szenario 3

7.4 Szenario 4: 0% AV-NS, 100% AV-RS ohne Bahn



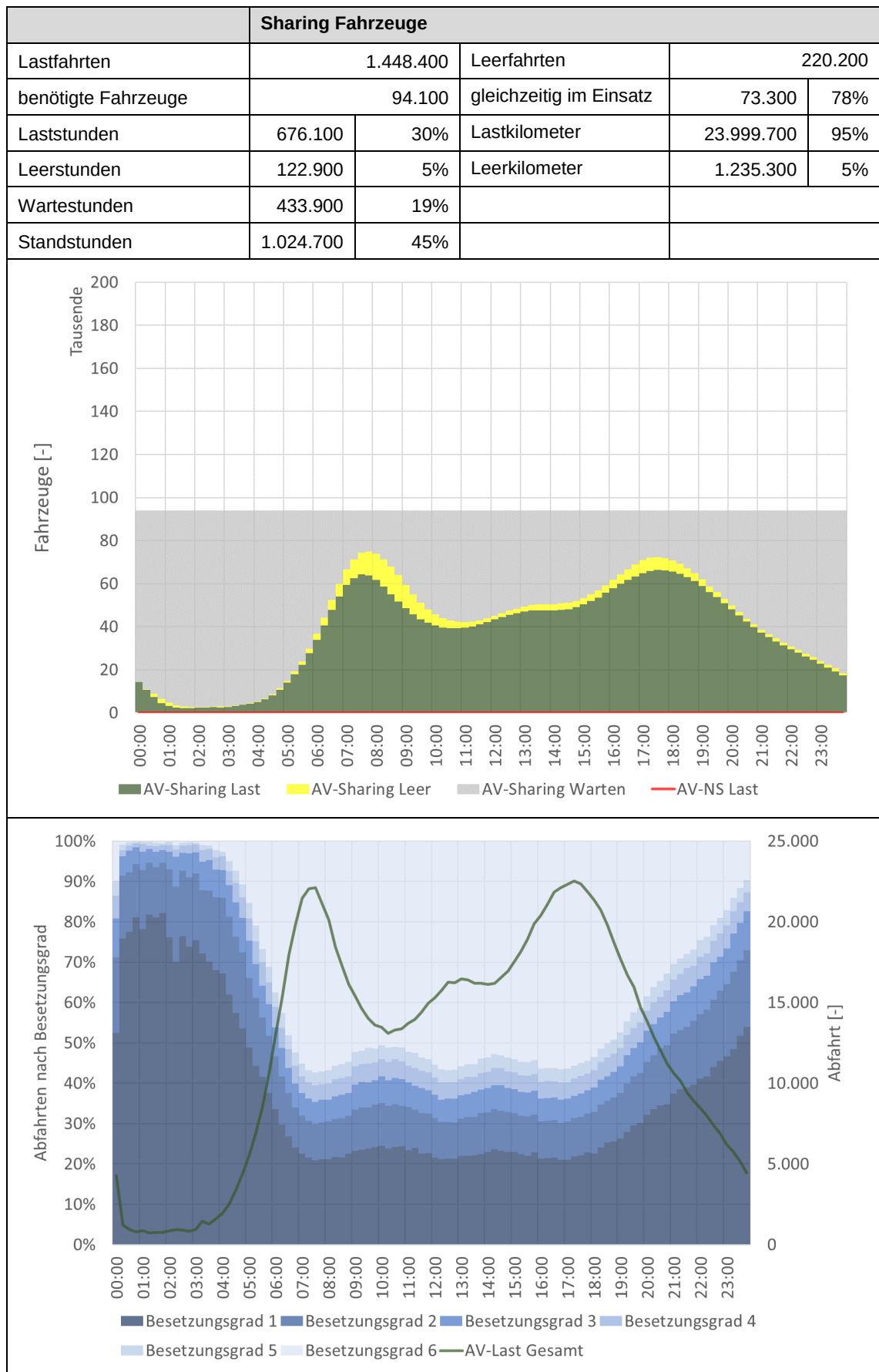
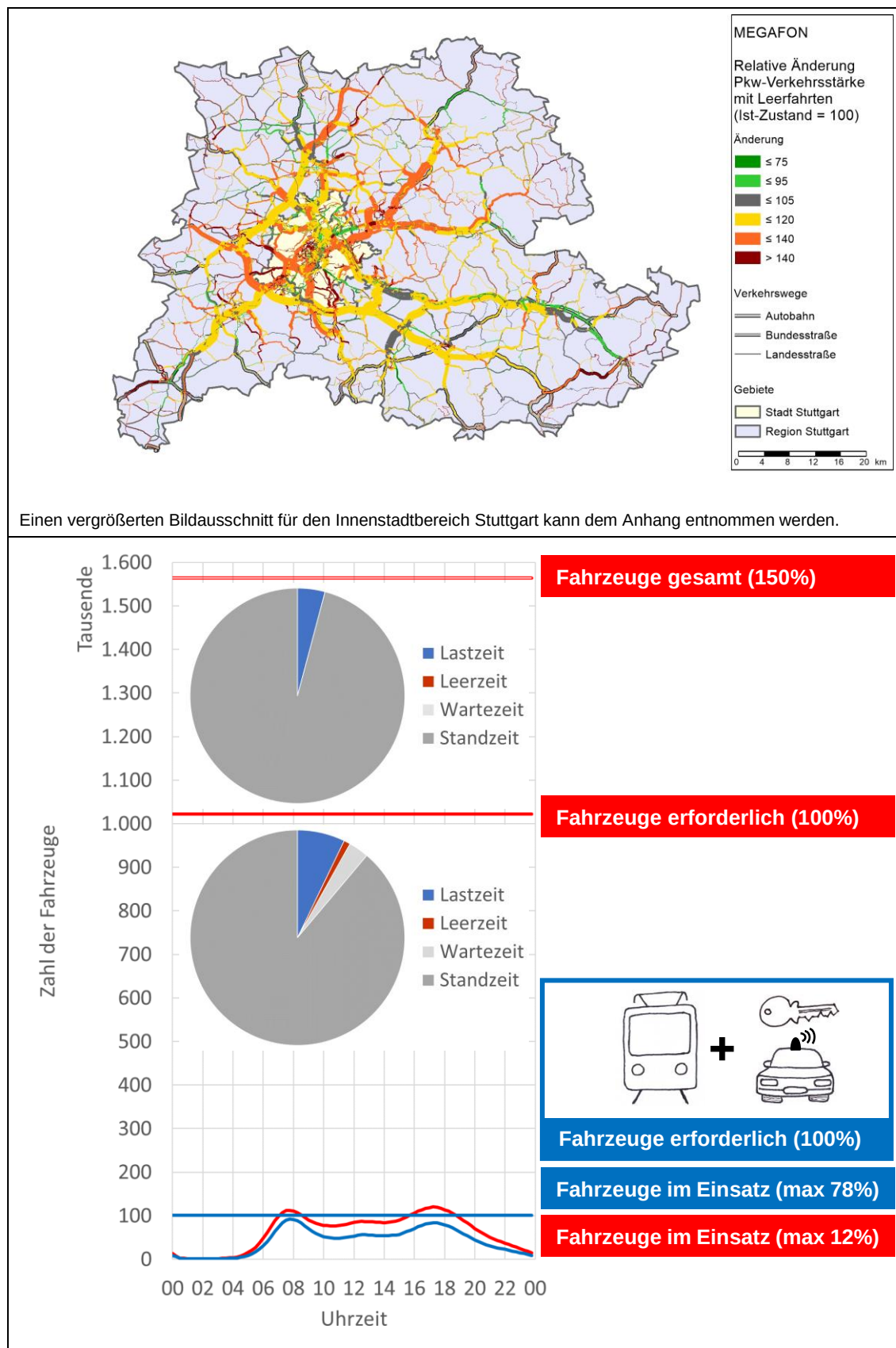


Bild 22: Steckbrief Szenario 4

7.5 Szenario 5: 50% AV-NS, 50% AV-CS mit Bahn



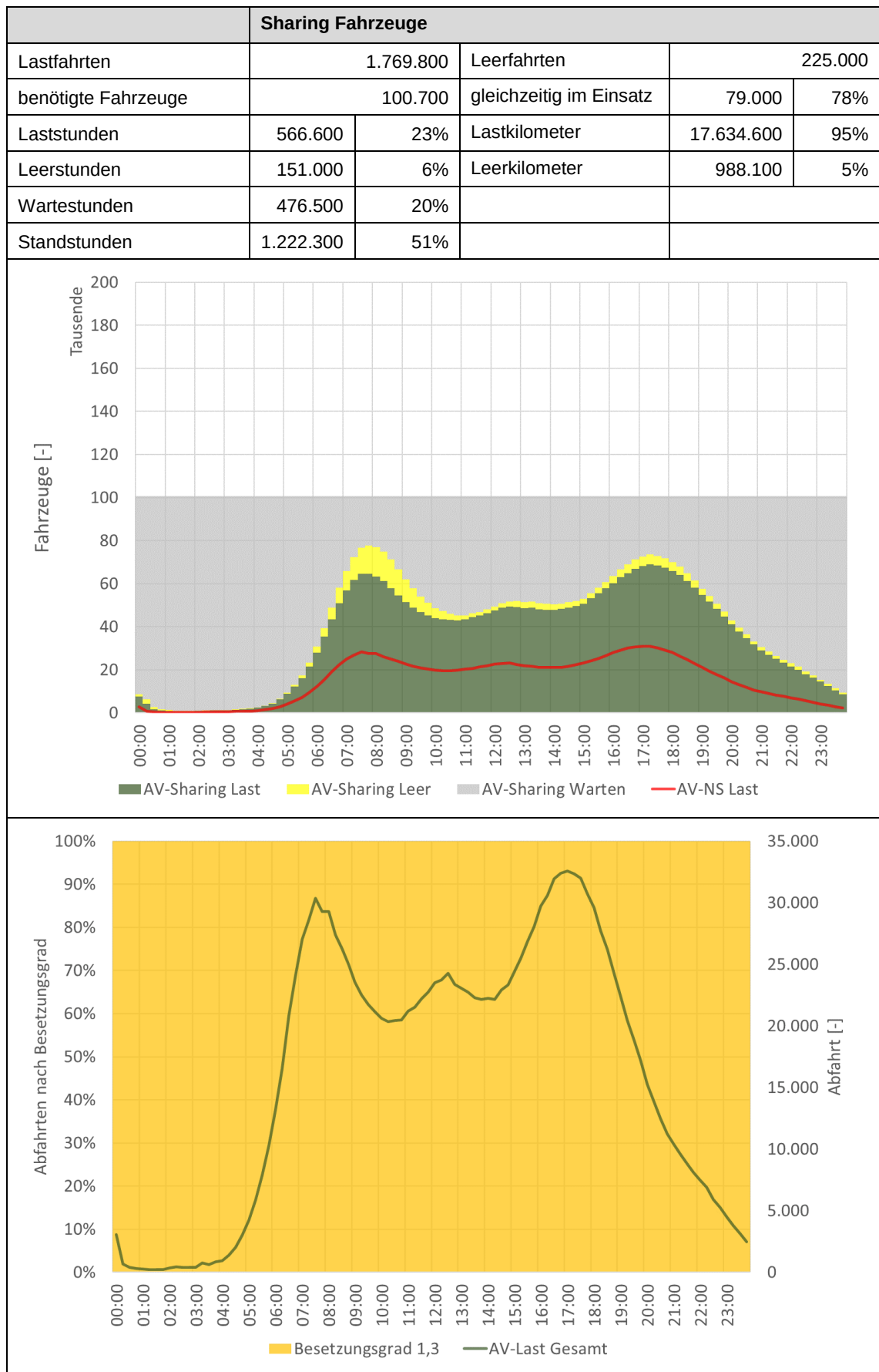
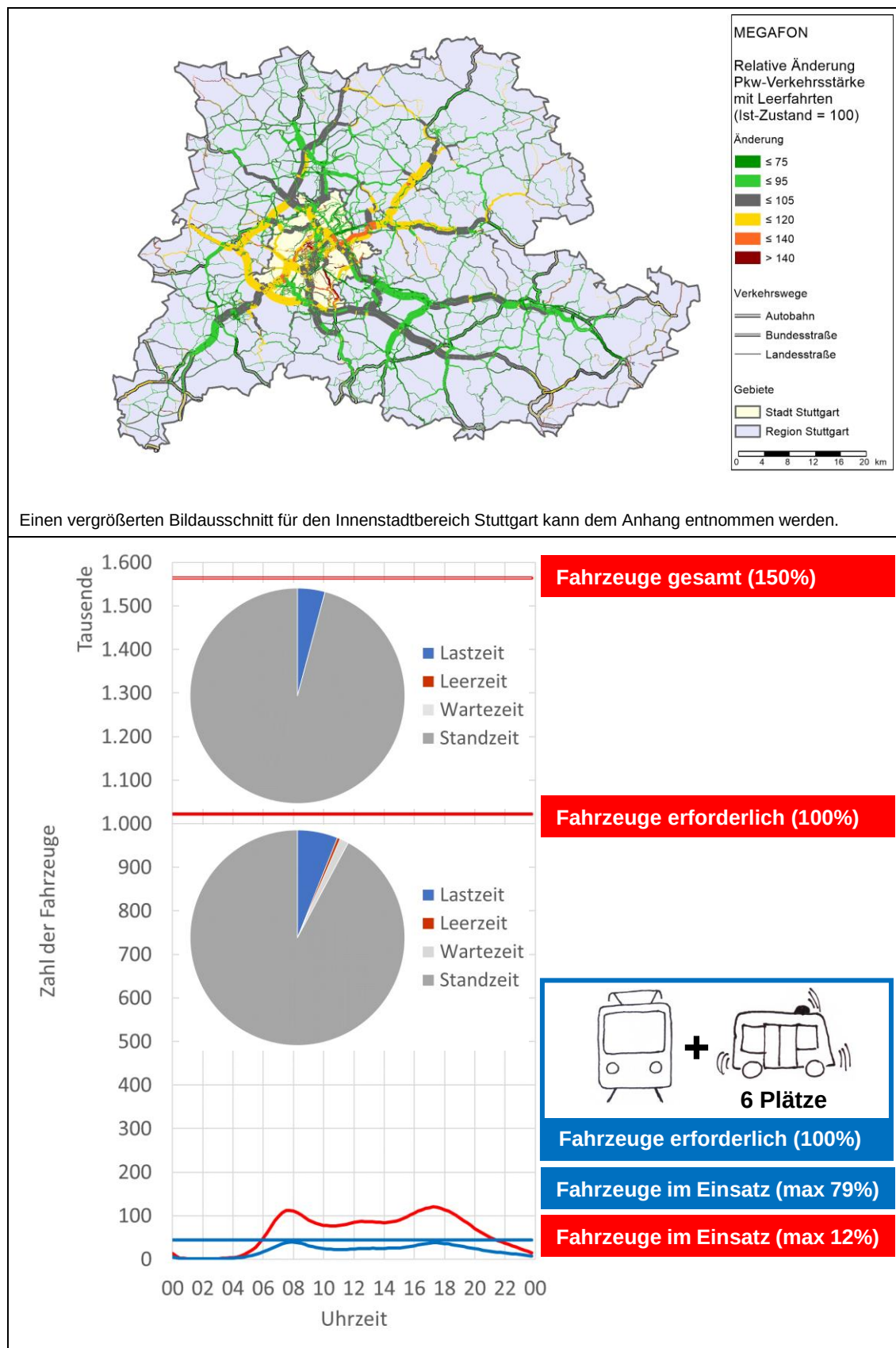


Bild 23: Steckbrief Szenario 5

7.6 Szenario 6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn



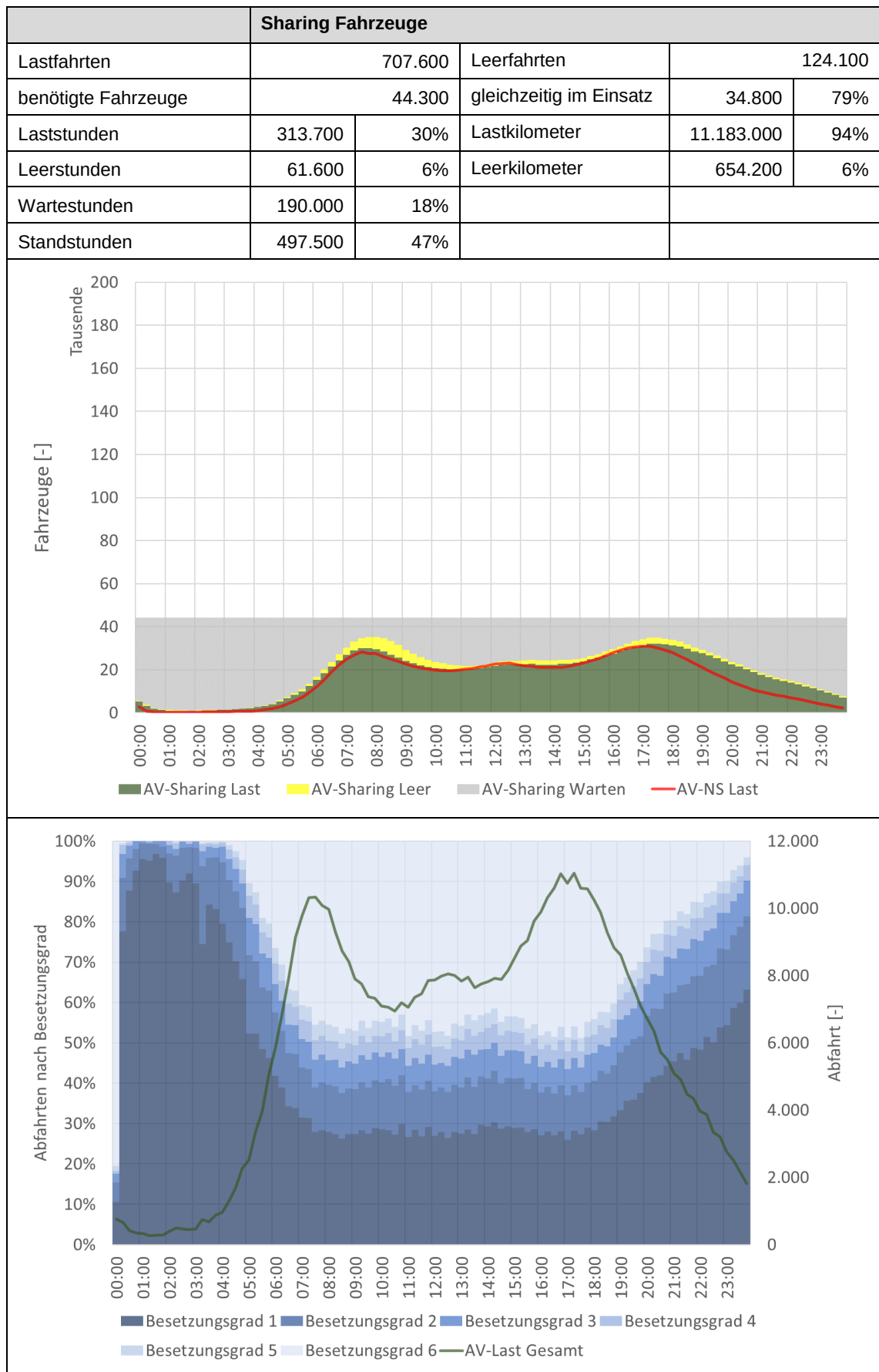
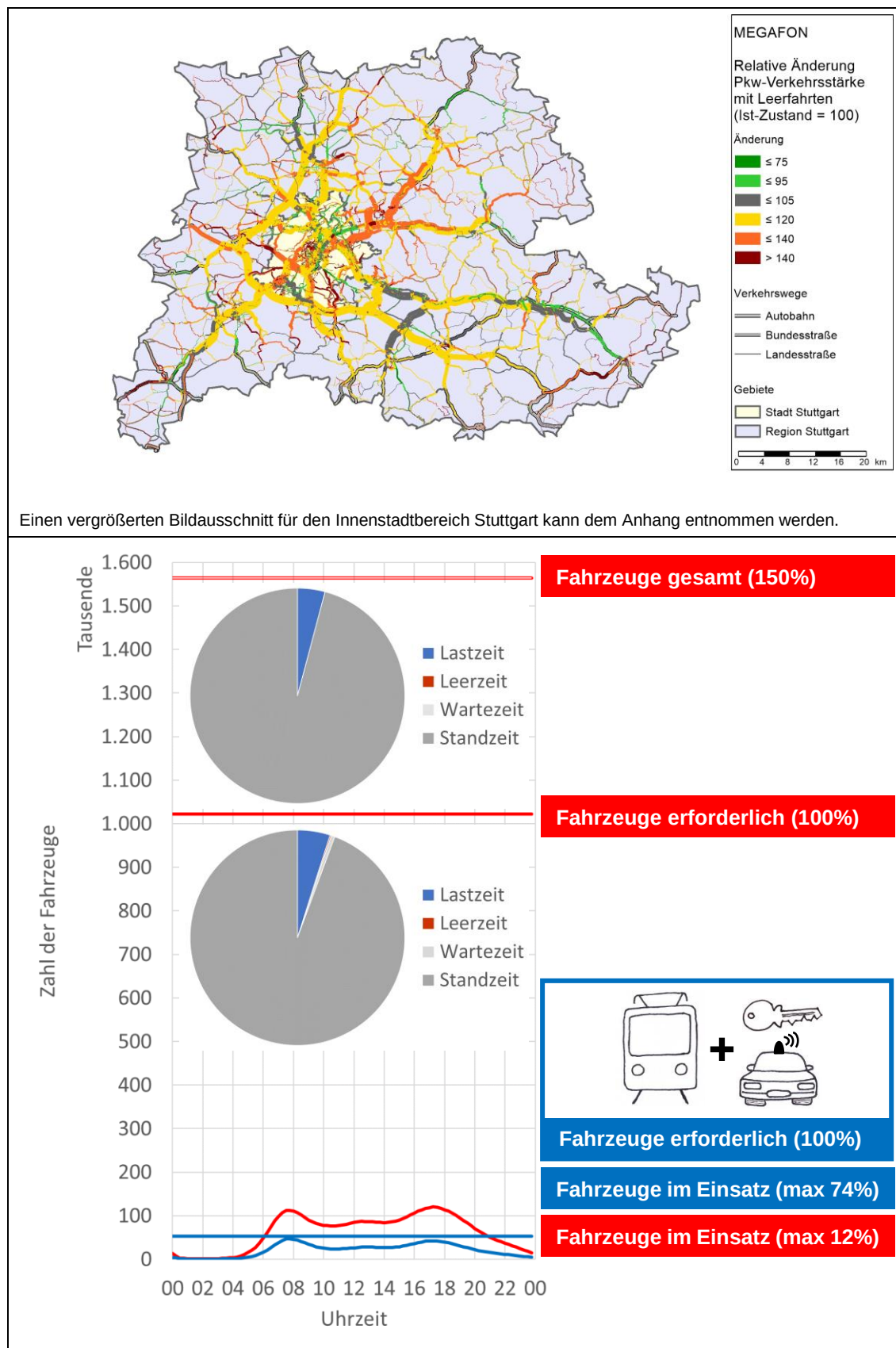


Bild 24: Steckbrief Szenario 6

7.7 Szenario 7: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn



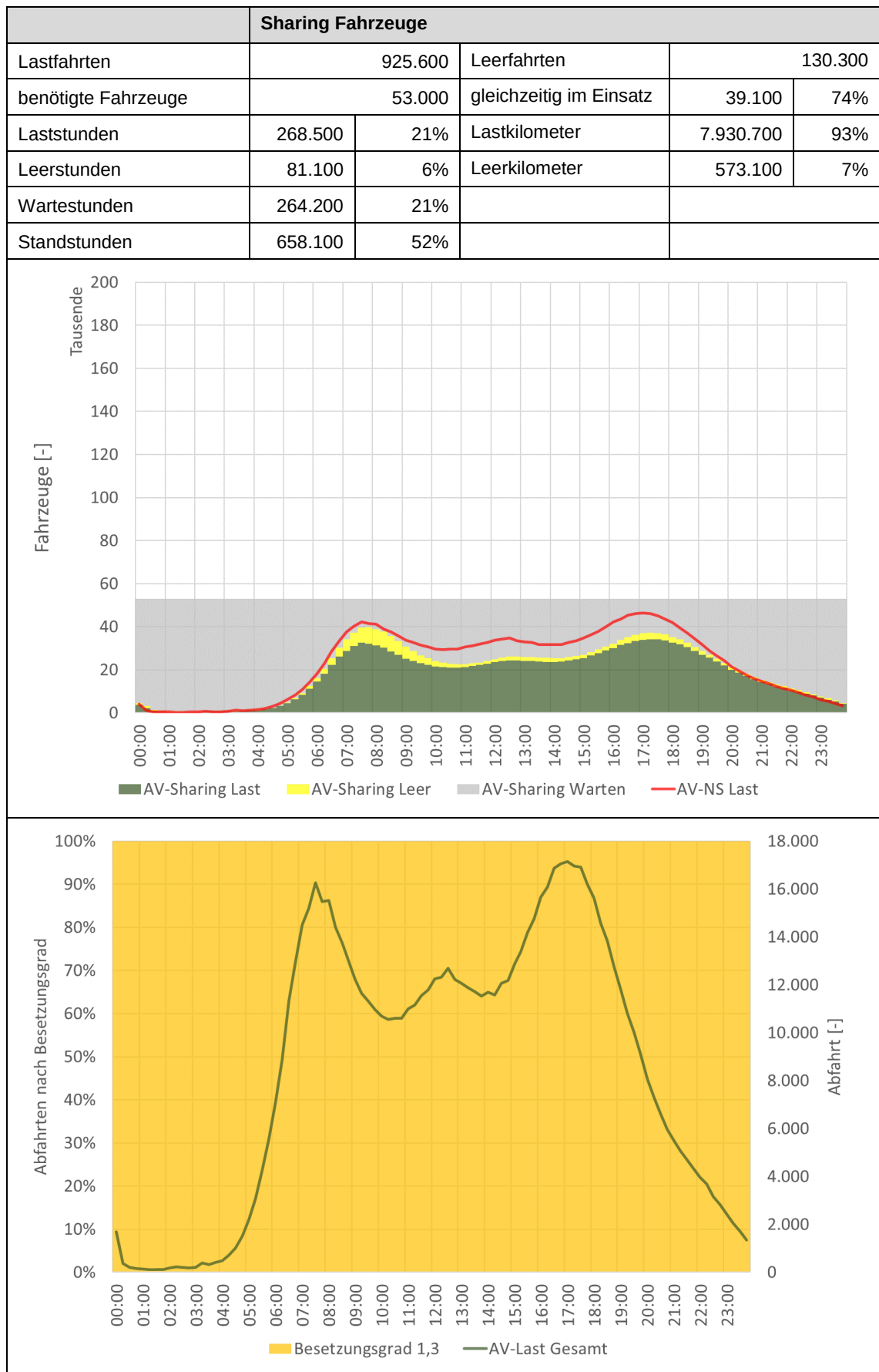
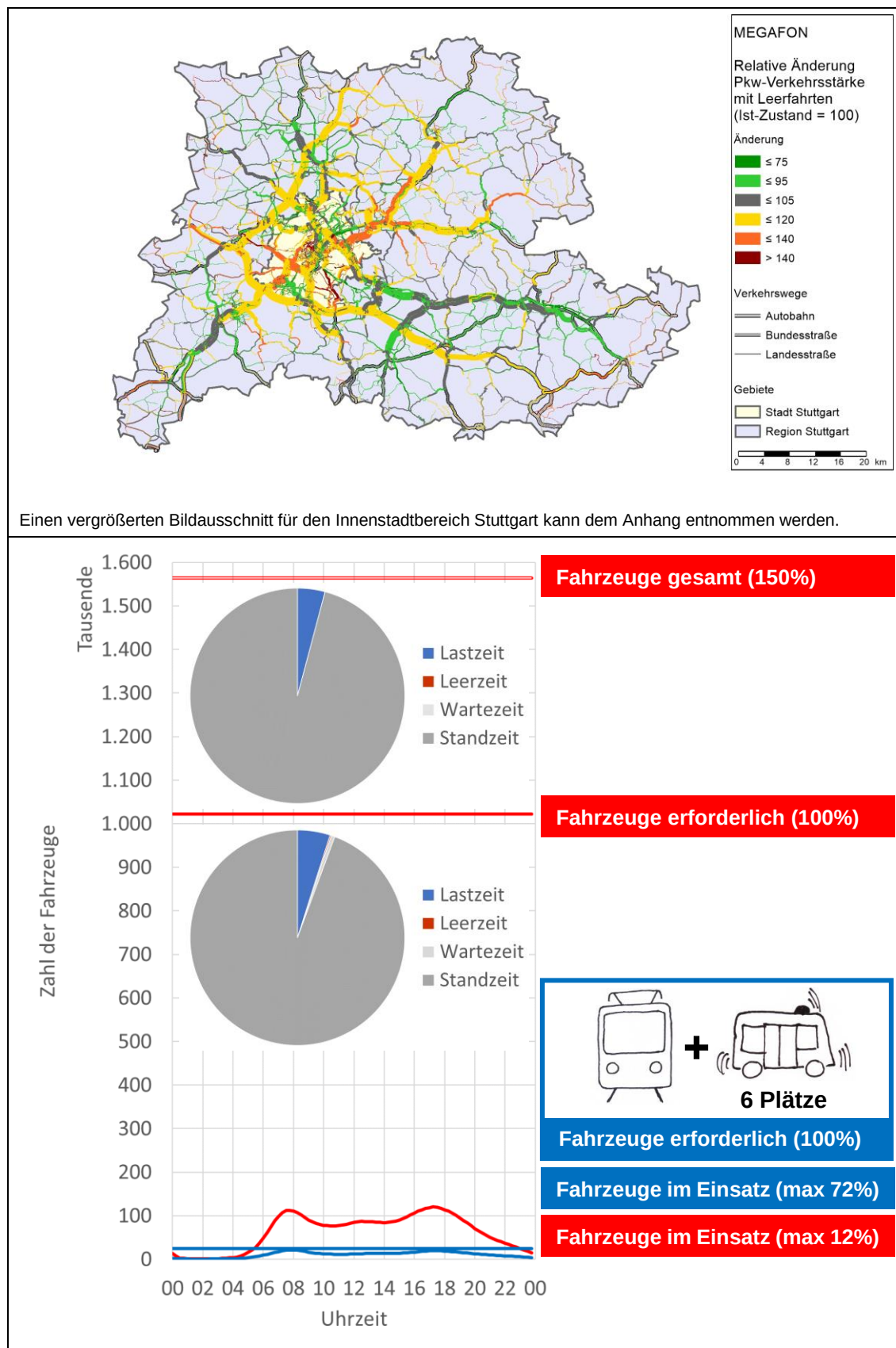


Bild 25: Steckbrief Szenario 7

7.8 Szenario 8: 75% AV-NS, 25% AV-RS mit Bahn



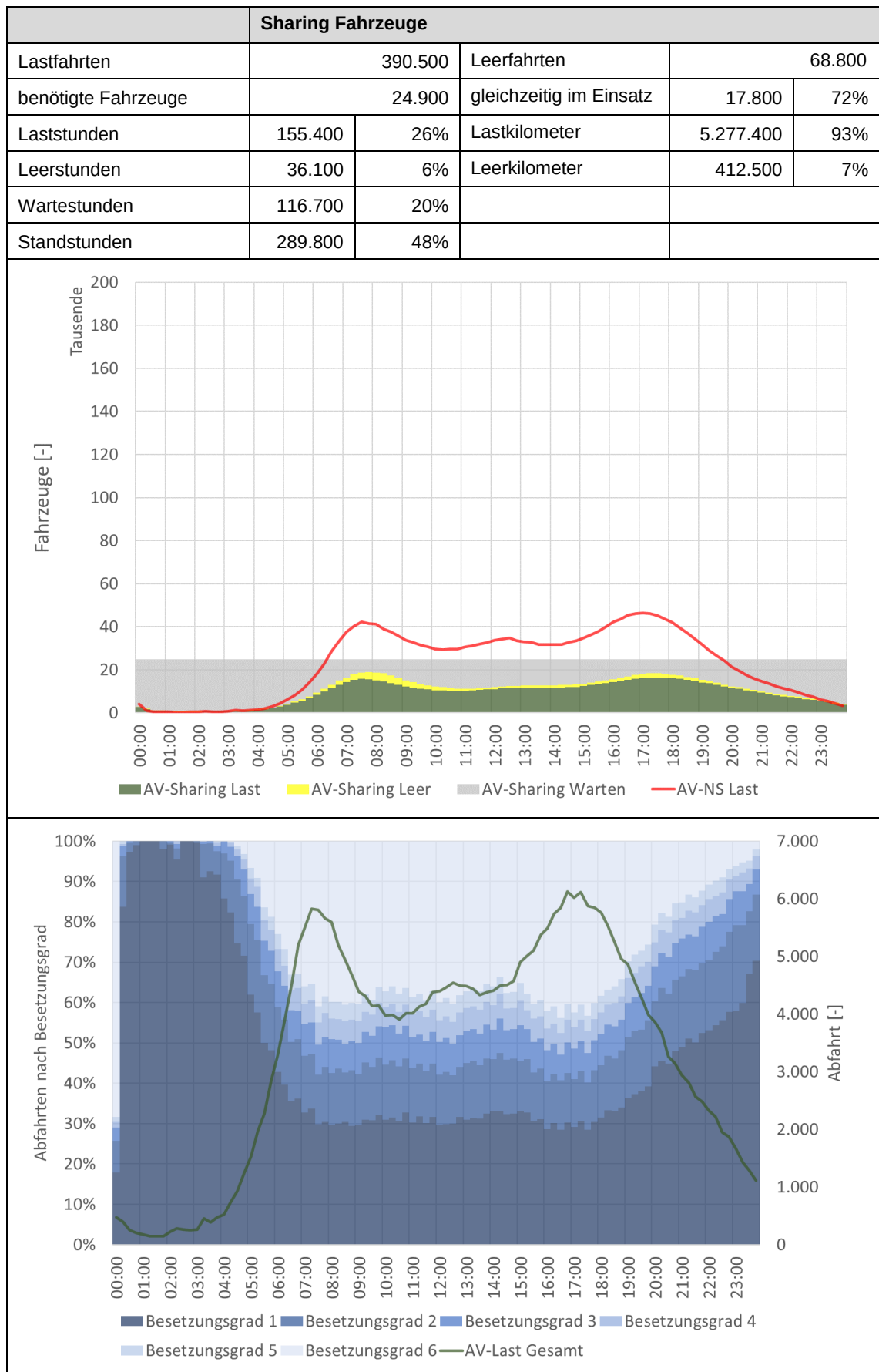
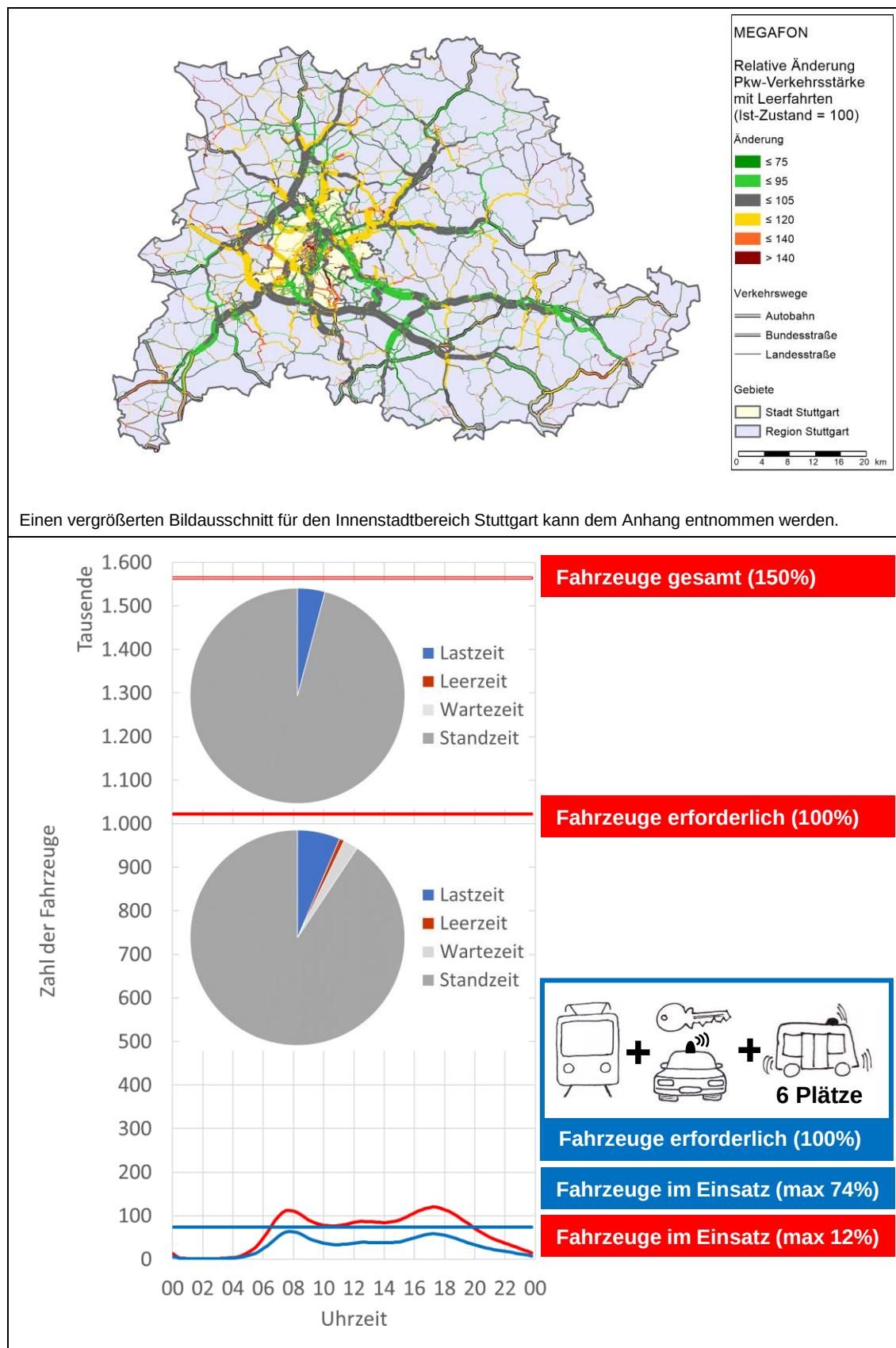


Bild 26: Steckbrief Szenario 8

7.9 Szenario 9: 50% AV-NS, 25% AV-CS, 25% AV-RS mit Bahn



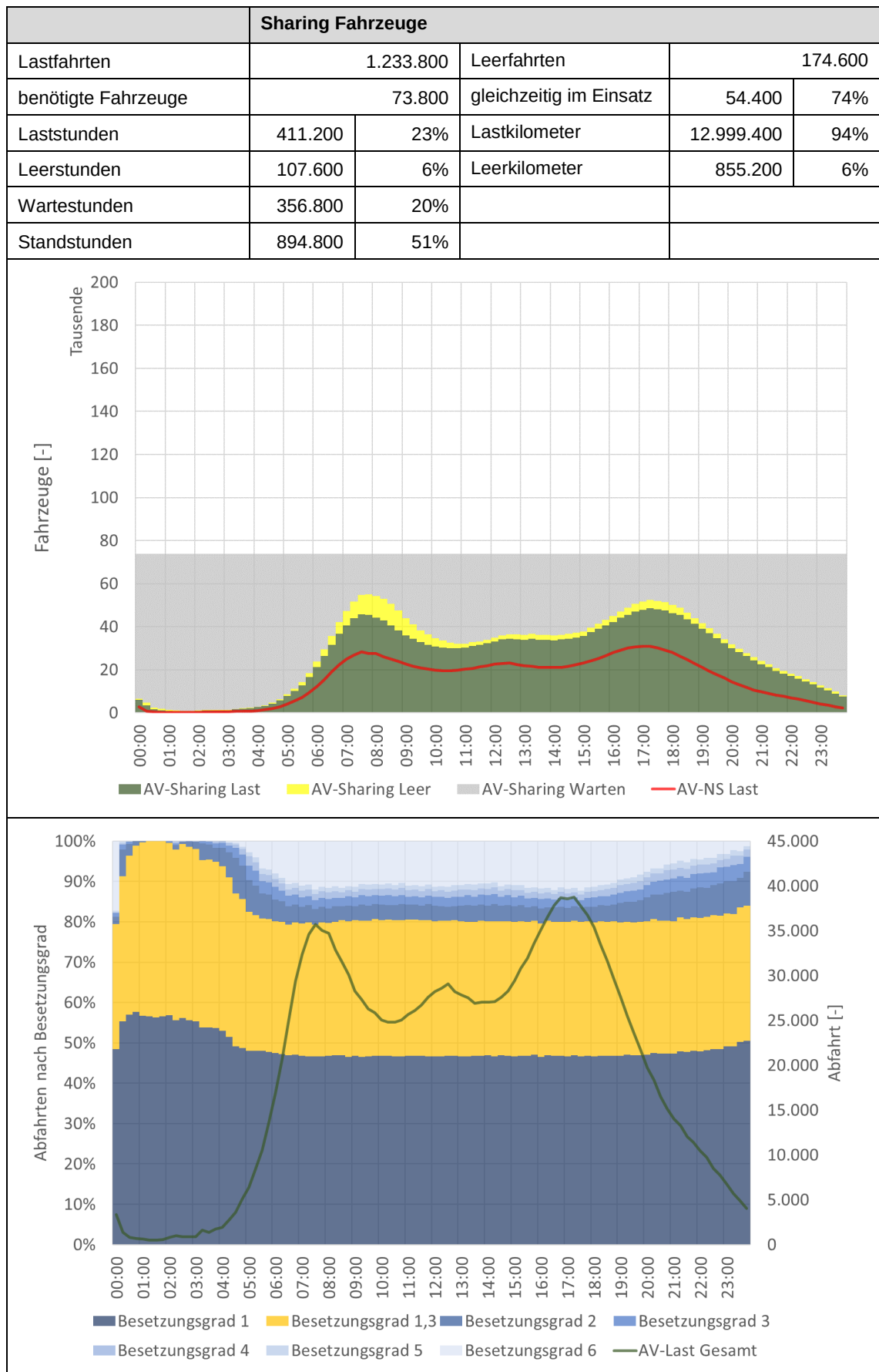


Bild 27: Steckbrief Szenario 9

7.10 Vergleich der Szenarien

Tabelle 4 gibt einen Überblick über wesentliche Kenngrößen der Szenarien. In Tabelle 5 werden die Kenngrößen im Hinblick auf die Fahrleistung, die Netzbelastung und den Verkehrsfluss verglichen. Der Besetzungsgrad wird einmal bezogen auf die Fahrten und einmal bezogen auf die Kilometer ausgewiesen. Hier gibt es Unterschiede beim Ridesharing, da sich der Besetzungsgrad im Lauf einer Fahrt verändert. Beim Bezug auf die Fahrzeugfahrten, wird der maximale Besetzungsgrad der Fahrt herangezogen, beim Bezug auf die Fahrzeugkilometer der mittlere Besetzungsgrad. Dieser Wert eignet sich für einen Vergleich mit dem heutigen Zustand.

Szenario	Bus& Bahn-Anteil	Anzahl Fahrzeuge	Fahrzeug-kilometer	erf. Park-plätze	Anteil der Zeit, in der Fzge nicht genutzt werden ¹⁾	Besetzungsgrad ¹⁾	
						bezogen auf Fahrten	bezogen auf Kilometer
0 Ist-Zustand	16%	100,0	100,0	100,0	96%	1,26	1,26
1 NS000, CS100, RS000, mBahn	11%	19,2	118,5	19,1	70%	1,30	1,30
2 NS000, CS000, RS100, mBahn	11%	7,1	63,9	7,2	64%	3,69	2,43
3 NS000, CS100, RS000, oBahn	0%	24,3	138,6	24,1	72%	1,30	1,30
4 NS000, CS000, RS100, oBahn	0%	9,2	80,6	9,2	65%	3,56	2,26
5 NS050, CS050, RS000, mBahn	11%	63,7	115,2	63,6	92%	1,28	1,30
6 NS050, CS000, RS050, mBahn	11%	58,2	93,5	58,2	93%	1,85	1,60
7 NS075, CS025, RS000, mBahn	11%	86,0	112,9	85,9	94%	1,28	1,56
8 NS075, CS000, RS025, mBahn	11%	83,2	103,9	83,2	95%	1,52	1,69
9 NS050, CS025, RS025, mBahn	11%	61,1	100,0	61,1	93%	1,52	1,50
1) bezogen auf alle Fahrzeuge (NS, CS und RS)							

Tabelle 4: Ausgewählte Kenngrößen der Szenarien im Überblick

Szenario		Fahrleistung	Netzbelastung und Verkehrsfluss
0	Ist-Zustand	100,0	- Das Verkehrsnetz ist in der Hauptverkehrszeit auf den Autobahnen und auf den Straßen nach und von Stuttgart überlastet. - Es treten deutliche Fahrzeitverlängerungen in der Hauptverkehrszeit auf. Diese Fahrzeitverlängerungen sind Teil des Nachfragegleichgewichts von Pkw und ÖV.
1	NS000, CS100, RS000, mBahn	118,5	- Die Verkehrsstärken erhöhen sich gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes um mehr als 20%. Zunahmen über 40% treten nur vereinzelt auf. - Trotz Kapazitätserhöhungen durch AV wird sich der Verkehrsfluss deshalb außerhalb der Autobahnen nicht verbessern.
2	NS000, CS000, RS100, mBahn	63,9	- Die Verkehrsstärken nehmen gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes deutlich ab. - Der Verkehrsfluss verbessert sich zu allen Tageszeiten deutlich.
3	NS000, CS100, RS000, oBahn	138,6	- Die Verkehrsstärken erhöhen sich gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes sehr stark. Zunahmen über 40% treten im gesamten Bereich der Stadt Stuttgart auf. - Trotz Kapazitätserhöhungen durch AV wird sich der Verkehrsfluss außerhalb der Autobahnen verschlechtern. In der Stadt Stuttgart wird der Verkehrsfluss schlechter sein als im Ist-Zustand.
4	NS000, CS000, RS100, oBahn	80,6	- Außerhalb der Stadt Stuttgart nehmen die Verkehrsstärken gegenüber dem Ist-Zustand ab. Im Stadtgebiet gibt es insbesondere im Bereich der Innenstadt deutliche Erhöhungen. Zunahmen über 40% treten in der Innenstadt von Stuttgart auf. - Der Verkehrsfluss wird sich in innerstädtischen Bereichen verschlechtern. Im Rest der Region wird der Verkehr in den meisten Bereichen besser fließen. In der Stuttgarter Innenstadt wird der Verkehrsfluss schlechter sein als im Ist-Zustand.
5	NS050, CS050, RS000, mBahn	115,2	- Die Verkehrsstärken erhöhen sich gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes um mehr als 20%. Zunahmen über 40% treten vereinzelt auf. - Trotz Kapazitätserhöhungen durch AV wird sich der Verkehrsfluss deshalb außerhalb der Autobahnen nicht verbessern.
6	NS050, CS000, RS050, mBahn	93,5	- Die Verkehrsstärken nehmen gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes ab. In einzelnen Bereichen wird es in Zunahmen geben. - Der Verkehrsfluss verbessert sich aufgrund von Kapazitätserhöhungen durch AV.
7	NS075, CS025, RS000, mBahn	112,9	- Die Verkehrsstärken erhöhen sich gegenüber dem Ist-Zustand in vielen Bereichen des Netzes. Zunahmen über 20% treten nur vereinzelt auf. - Der Verkehrsfluss kann sich aufgrund von Kapazitätserhöhungen durch AV verbessern.
8	NS075, CS000, RS025, mBahn	103,9	- Die Verkehrsstärken ändern sich gegenüber dem Ist-Zustand in kleinem Umfang. Zunahmen über 20% treten nicht auf. - Der Verkehrsfluss kann sich aufgrund von Kapazitätserhöhungen durch AV verbessern.
9	NS050, CS025, RS025, mBahn	100,0	- Die Verkehrsstärken ändern sich gegenüber dem Ist-Zustand lokal in kleinem Umfang. Zunahmen über 20% treten nicht auf. - Der Verkehrsfluss kann sich aufgrund von Kapazitätserhöhungen durch AV verbessern.

Tabelle 5: Vergleich der Szenarien im Hinblick auf die Fahrleistung, die Netzbelastung und den Verkehrsfluss

8 Betreiberkonzept

Um den Anforderungen der Zukunft (Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung, effizienter Einsatz der Infrastruktur, Emissionsminimierung, ...) gerecht zu werden, ist anzustreben den schienenengebundenen ÖPNV und SPNV durch möglichst hohe Modal Split Werte im Rideselling zu ergänzen. Daher sind den folgenden Überlegungen die Szenarien 2, 6 und 8 unterstellt.

8.1 Anfangsinvestition

Ein Rideselling System benötigt relativ wartungsarme, robuste und laufleistungsstarke Fahrzeuge. In den Modelluntersuchungen wurde eine konstante Gefäßgröße von sechs unterstellt. Bei einem geschätzten durchschnittlichen Marktpreis von 60.000 € pro Fahrzeug entstehen alleine für die Fahrzeugflotte folgende Investitionskosten:

Szenario	Benötigte Fahrzeuge	Investitionskosten
2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn	72.600	4,3 Mrd. €
6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn	44.300	2,7 Mrd. €
8: 75% AV-NS, 25% AV-RS mit Bahn	24.900	1,5 Mrd. €

Tabelle 6: Investitionskosten für Rideselling Fahrzeugflotte

Zusätzlich zu den Kosten für die Fahrzeugflotte entstehen weitere Investitionskosten für die Infrastruktur (Einrichtungen für Abstellung, Wartung, Betankung, Verkehrslenkung etc.), die hier nicht näher aufgeführt werden.

Wenn man die Höhe der Investitionskosten mit den jährlichen Ausgaben des VVS für die Verkehrsbedienung im Tarifverbund (776 Mio. € im Jahr 2015⁴) gegenüber stellt, wird deutlich, dass diese Anfangsinvestition nicht einfach aus dem Verkehrsetat finanziert werden kann, sondern dass hier über neue Finanzierungsmodelle nachgedacht werden muss. Folgende Finanzierungsansätze könnten eine Rolle spielen:

- Verkehrsabgabe im VVS-Gebiet
- Gründung einer Betreibergesellschaft mit Partnern
 - Unternehmen aus Automobil-/Zulieferindustrie (Daimler, Bosch, ...)
 - Energieversorger (EnBW, Stadtwerke ...)
 - Kommunen, Region Stuttgart, ...
- Subventionen und Fördermittel von Bund und Land
- Kreditaufnahme

⁴ <http://www.vvs.de/download/Verbundbericht-Begleitheft-2015.pdf>

8.2 Mögliche Kosteneinsparungen

Den hohen Investitionskosten stehen mögliche Kosteneinsparungen gegenüber:

- Einsparungen bei Fahrdienst, Fahrzeugbeschaffung und -bereitstellung,
- Einsparungen beim Kraftstoff (in Abhängigkeit von Preisentwicklung/Abgaben für elektrischen Strom)
- Bisherige Busbetriebshöfe/Werkstätten könnten als Service- und Wartehallen für die AV benutzt werden

8.3 Betriebskosten

Für eine erste grobe Schätzung der Betriebskosten einer Rideselling Fahrzeugflotte wurde in den weiteren Überlegungen das Szenario 8 (75% AV-NS, 25% AV-RS mit Bahn) unterstellt. Für die Berechnung wurden Kosten und Preise aus dem Jahr 2016 verwendet, da keine seriösen Aussagen dazu gemacht werden können, zu welchem Zeitpunkt ein Rideselling System eingeführt wird und wie die Preisentwicklung bis dahin aussieht.

Lastkilometer pro Tag	5,28 Mio. km
Leerkilometer pro Tag	0,41 Mio. km
Gesamtkilometer pro Tag	5,69 Mio. km
Fahrzeugflottengröße (AV-RS)	24.900
Durchschnittliche Fahrleistung pro AV-RS und Tag	228 km
Durchschnittliche Fahrleistung pro AV-RS und Jahr (Faktor 300)	68.500 km
Endenergieverbrauch pro 100 km	20 kWh
Durchschnittlicher Strompreis 2016	0,28 €/kWh
Antriebskosten pro km	0,06 €/km
Nutzungsdauer pro AV-RS	6 Jahre
Wartungs- und Servicekosten pro AV-RS und Jahr (ohne Kosten für Infrastruktur wie Werkstatt, Betriebshöfe,...)	3.000 €
Gesamtbetriebskosten pro km und AV-RS inkl. Reinvestition	0,25 €/km

Tabelle 7: Berechnung der Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer⁵

⁵ <https://www.e-stations.de/elektroautos/kostenrechner>

Den Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer können nun die potentiellen Einnahmen gegenübergestellt werden. Bei einem im Modell ermittelten durchschnittlichen Besetzungsgrad von 3,7 Personen pro AV-RS und 10,71 Mio. Personenkilometer pro Tag im RS-System erreicht man folgende Kilometerkosten pro Nutzer:

Verkehrsleistung pro Tag	10,71 Mio. Personenkilometer
Betriebskosten pro Tag	1,40 Mio.€
Overheadkosten (u.a. Verwaltung, Verkehrssteuerung)	15 %
Gesamtbetriebskosten pro Tag	1,61 Mio. €
Mindestkosten pro Kilometer und Nutzer für positives Betriebsergebnis	0,15 €/Personenkilometer

Tabelle 8: Kilometerkosten pro Nutzer für positives Betriebsergebnis

Die Nutzerkosten von ca. 15 Cent pro Kilometer zeigen, dass auf Basis dieser Überlegungen ein zukünftiges autonomes Rideselling-System wirtschaftlich betrieben werden könnte und trotzdem attraktive Fahrpreise für den Nutzer möglich wären. Durch den möglichen Verzicht auf einen Fahrer würden den recht hohen Investitionskosten niedrige Antriebskosten und somit geringe Betriebskosten gegenüberstehen.

Zu erwähnen ist allerdings, dass ein Rideselling System von einer in dieser Untersuchung nicht ermittelten kritischen Masse lebt. Die im Szenario 8 unterstellten 25 % des motorisierten Verkehrs als Nutzer von AV-RS müssen erst einmal erreicht werden, damit sich diese wirtschaftlich günstigen Bedingungen einstellen. Bei niedrigeren Nutzungsgraden sinkt die Effizienz eines RS-Systems enorm, da weniger Fahrten gematcht werden können, der Besetzungsgrad sinkt und die Leerfahrten zunehmen. Bis ein wirtschaftlich auskömmlicher Zustand erreicht werden kann, sind einige defizitäre Jahre zu überstehen, was auch der Grund dafür sein könnte, dass sich private Unternehmen mit Investitionen bisher zurückhalten. Dies könnte eine Chance für öffentliche Verkehrsunternehmen sein, in diesen Markt einzudringen und sich zu etablieren.

9 Fazit

Die Einführung autonomer Fahrzeuge wird das Verkehrsangebot und damit die Mobilitätsoptionen für die Verkehrsteilnehmer in großem Umfang verändern. Tabelle 9 zeigt wesentliche Eigenschaften des heutigen Pkw-Systems und der zukünftigen Pkw-Systeme ohne und mit Sharing. In dieses Zukunftsbild muss auch der Übergang auf die Elektromobilität aufgenommen werden. Dies wird zu einer Änderung im Aufkommen der Energiesteuern führen und damit auch zu einer Notwendigkeit der Neuordnung der Finanzierung der Mobilitätsinfrastruktur. Diese veränderten Eigenschaften und Preise werden Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben, die aber in den Szenarien nicht abgebildet sind.

Systemeigenschaft	Pkw heute NS	AV-NS	AV-CS	AV-RS
Anmeldung	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
fahrfremde Tätigkeit	nein	Ja	ja	ja
Führerscheinbesitz	erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
Fahrzeugnutzung	Fahrzeug ist privater Raum, private Gegenstände können dauerhaft im Fahrzeug verbleiben	Fahrzeug ist privater Raum, private Gegenstände können dauerhaft im Fahrzeug verbleiben	Fahrzeug ist privater Raum, private Gegenstände können während der Mietzeit im Fahrzeug verbleiben	Fahrzeug ist geteilter Raum, private Gegenstände können nicht im Fahrzeug verbleiben
Start- und Endpunkt der Fahrt	Stellplatz in der Nähe von Start- und Endpunkt	direkt am Start- und Endpunkt (Valet-Parking)	direkt am Start- und Endpunkt	direkt am Start- und Endpunkt oder an einem nahegelegenen Sammelpunkt
Preisgestaltung	Kraftstoffkosten in der gleichen Größenordnung wie ÖPNV Gesamtkosten höher als ÖPNV	Kosten werden in ähnlicher Größenordnung wie beim heutigen Pkw liegen (Mehrkosten Beschaffung, Energie und, Versicherung günstiger)	AV-CS wird für die Nutzer preislich attraktiver sein als Carsharing heute.	Kosten werden i.d.R. niedriger sein, als beim AV-NS und AV-CS.
			Preise können zeitabhängig schwanken.	Preise können zeitabhängig schwanken.
	Anschaffungskosten abhängig von Fahrzeug-eigenschaften (Größe, Alter, Ausstattung, Marke)	Anschaffungskosten abhängig von Fahrzeug-eigenschaften (Größe, Alter, Ausstattung, Marke)	Es kann konkurrierende Anbieter mit unterschiedlichen Leistungen geben	Es kann konkurrierende Anbieter mit unterschiedlichen Leistungen geben
	Parken kann kostenpflichtig sein	Parken kann kostenpflichtig sein	Parken während der Mietzeit kann kostenpflichtig sein	Es fallen keine Parkkosten an

Tabelle 9: Eigenschaften der verschiedenen Pkw-Systeme

Die in der vorliegenden Untersuchung analysierten Extrem-Szenarien stellen keine Szenarien dar, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eintreten werden. Sie dienen vielmehr dazu, die Wirkungen autonomer Fahrzeuge für verschiedene Anteile von geteilten Fahrzeugen abzuschätzen. Die Aufteilung der Nachfrage auf die verschiedenen Modi stellt Annahmen dar, die in einem zukünftigen Zustand mit AV von den Reisezeiten und Reisekosten beeinflusst werden. Allerdings steht zu erwarten, dass die Einführung des vollautonomen Fahrens den Angeboten, die Mobilität als einen Service vermitteln, einen Schub vermitteln wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass AV dann eine positive Wirkung haben werden, wenn die Verkehrsmittelwahl so beeinflusst werden kann, dass

- ein Hochleistungs-ÖV-Angebot (Schiene, hochwertiges Bussystem) erhalten bleibt oder verbessert wird und
- viele Ortsveränderungen mit Ridesharing abgewickelt werden.

Diese aus verkehrsplanerischer Sicht wünschenswerte Entwicklung wird aber nicht ohne flankierende Maßnahmen eintreten. Ohne flankierende Maßnahmen ist ein Rückgang der Nachfrage im ÖPNV aus den folgenden Gründen wahrscheinlich:

- Der Pkw wird als autonomes Fahrzeug komfortabler werden und auch Menschen ohne Fahrerlaubnis die Nutzung eines Pkw ermöglichen.
- Entfallende Parkvorgänge werden die Reisezeit im Pkw verkürzen.
- Auf vielen Straßenstrecken werden AV die Leistungsfähigkeit erhöhen und so die Reisezeit auch bei einer Zunahme der Verkehrsstärke reduzieren. Friedrich (2015) schätzt, dass im Stadtverkehr bei rein autonomem Verkehr eine Kapazitätserhöhung von etwa 40 % und auf Autobahnen von etwa 80 % möglich ist.
- Attraktive Reisezeitverhältnisse kann der ÖPNV dann nur auf Relationen in die Innenstädte bieten. Auf diesen Relationen ist der ÖV allerdings auf jeden Fall auszubauen, da sonst die zunehmenden Zielfahrten ins Zentrum nicht abgewickelt werden könnten.
- Ein ausschließlich privat genutzter Pkw wird auch als AV nicht wesentlich teurer sein als ein heutiger Pkw und dem Nutzer zusätzliche Vorteile gegenüber einem Sharing-Fahrzeug bieten.
- Preislich attraktive Angebote mit AV-CS oder AV-RS werden bei Ortsveränderungen, für die es mit dem ÖV keine schnellen Direktverbindungen gibt, den Nutzern von AV-Fahrzeugen Reisezeitvorteile bringen. Diese Reisezeitvorteile führen bei Ortsveränderungen, die heute mit Bus und Bahn durchgeführt werden, auch zu einem Fahrgastrückgang bei der Bahn.
- Der Markteintritt von AV-CS und AC-RS-Angeboten konkurriert dementsprechend mit dem klassischen ÖV und dem Auftrag zur Daseinsvorsorge. Die öffentliche Hand sollte sich dementsprechend über gesetzliche Regelungen (PBefG) und lokale Konzessionsvergabe ein Mitspracherecht zur Sicherung der Gemeinwohlinteressen schaffen bzw. sichern.

- Die Preisgestaltung von Mobilitätsdienstleistungen mit AV-CS und AV-RS könnte von privaten Anbietern bestimmt werden und kann dann, anders als Fahrpreise im ÖPNV, nicht von der öffentlichen Hand beeinflusst werden.

Als flankierende Maßnahmen kommen folgende Maßnahmen in Frage:

- Änderung der Regelgeschwindigkeit für Kfz in Städten:
Die Regelgeschwindigkeit in Städten wird auf 30 km/h begrenzt. In Erschließungsstraßen, in denen es viel Mischverkehr von AV, Radfahren und Fußgängern gibt, wird die Geschwindigkeit auf 20 km/h reduziert. In diesen Straßen haben AV keinen Vorrang gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern. Diese Maßnahme wurde in der vorliegenden Untersuchung bereits unterstellt.
- Entwicklung spezieller Ridesharing-Fahrzeuge:
Damit Ridesharing für die Verkehrsteilnehmer attraktiv ist, sind Fahrzeuge erforderlich, die einen möglichst großen Schutz der Privatsphäre ermöglichen und die es erlauben, Gepäck (Einkäufe, Schulranzen, Koffer) einfach zu befördern.
- Erhalt von Buslinien auf Verkehrsachsen und Ausbau mit Elementen eines Bus Rapid Transit Systems.
- Straßenbenutzungsgebühren und Parkgebühren:
Um als öffentliche Hand die Preise privater Anbieter von Mobilitätsdienstleistungen beeinflussen zu können, erscheinen Straßenbenutzungsgebühren sinnvoll. Diese Straßenbenutzungsgebühren müssen räumlich und zeitlich differenziert werden, so dass in den Innenstädten und in der Hauptverkehrszeit höhere Preise verlangt werden können. Die Preise könnten auch vom Besetzungsgrad abhängen. Öffentliche Ridesharing-Systeme oder Ridesharing-Systeme, die gewisse Standards erfüllen, könnten von den Gebühren ausgenommen werden. Parkgebühren und Parkregelungen könnten so modifiziert werden, dass alle Stellplätze im Straßenraum bepreist und die heute üblichen Bewohnerregelungen aufgehoben werden.
- Zufahrtsbeschränkungen:
In Innenstadtbereichen, in denen eine sehr hohe Pkw-Nachfrage auftritt (Bahnhofsvorplätze, Stadien), könnten Zufahrtsbeschränkungen für private AV-Fahrzeuge (AV-NS und AV-CS) eingerichtet werden.
- Entwicklung einer einheitlichen Plattform für den ÖPNV in Deutschland (Tickets, Abrechnung, Buchung).

Die Maßnahmen Regelgeschwindigkeit 30, Straßenbenutzungsgebühren und Zufahrtsbeschränkungen könnten heute bereits umgesetzt werden und dem Stadtverkehr allgemein und dem ÖPNV im speziellen Vorteile bringen.

10 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse der Studie zeigen die positivsten Wirkungen von AV in jenen Szenarien, die einen hohen Anteil von Ridesharing/Rideselling in Verbindung mit einem leistungsfähigen ÖPNV auf Hauptachsen (Schiene, hochwertiges Bussystem) aufweisen. Diese Szenarien schneiden sowohl die Umweltwirkung betreffend (Energieverbrauch, Klimaschutz) als auch hinsichtlich des Flächenverbrauchs und der Auslastung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur am besten ab. Es wird andererseits auch deutlich, dass eine rein automobilbezogene Einführung der Technik oder ein Vernachlässigen von politischen Steuerungsmaßnahmen, ungewollte Effekte mit sich bringen würde.

In Kapitel 8 „Gedankliche Ausgestaltung eines Betreibermodells“ werden für ein Ridesharing/Rideselling-Konzept in Verbindung mit ÖPNV erste Überlegungen skizziert. Aus Sicht der Projektpartner empfiehlt sich deshalb, gerade solchen Szenarien weitere Aufmerksamkeit zu schenken und diese auch von politischer Seite zu fördern. In der Koalitionsvereinbarung der neuen baden-württembergischen Landesregierung (Grüne, CDU) vom Mai 2016 findet sich dazu ein Hinweis zur Förderung von Studien von autonomem Fahren auch im öffentlichen Verkehr.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Fragestellungen, die in Folgestudien oder –projekten angegangen werden könnten:

- Vorstufe eines Projekts mit autonom fahrenden Fahrzeugen: Pilotprojekte mit nicht-autonomen Ridesharing-Flotten (Shuttles) als Ergänzung zum ÖPNV-Angebot. Hierbei können digitale Kundenschnittstellen, Anmeldeverfahren, Nachfrage- und Angebotsalgorithmen, intermodales Routing (ÖV, Ridesharing) sowie Konzepte von Zustiegspunkten (virtuelle Haltestellen) und Kommunikationsmaßnahmen in ihren Wirkungen erforscht und aufgebaut werden.
- Ausbau des Ridesharing unter Führung des ÖPNV (Kundenanmeldung, Tarife etc.) für bestimmte Teilmärkte als Ergänzung in zeitlicher oder räumlicher Hinsicht oder als Premiumangebot mit Direktverbindung
- Einrichtung und Betrieb von Pilotstrecken für AV-Ridesharing als Ergänzung zum ÖPNV (z.B. last mile Verkehre), Kleinräumige Simulation einer „AV-Ridesharing-Welt“:
 - Erfahrungsgewinn und Erwerb von Kompetenzen mit Betrieb, Wartung etc. von AV-Flotten.
 - Steuerung von AV-Ridesharing-Flotten abgestimmt mit ÖPNV-Angebot und der Steuerung von ÖPNV-Flotten.
 - Erforschung neuer Kundenpotenziale und neuer Geschäftsmodelle auf Basis digitaler Kundenschnittstellen und der Verknüpfung von Hochleistungs-ÖPNV (Schiene, Bus) und ÖPNV-AV-Ridesharing.

- Aufbau von Sharing-Plattformen unter Koordination der Akteure aus der ÖPNV-Branche (Verbindung von ÖPNV, AV-Ridesharing-Konzepten und andere Verkehrsarten)
- Untersuchung rechtlicher Fragestellungen des Betriebs von ÖPNV-AV-Ridesharing-Flotten im ÖPNV-Betrieb (Personenbeförderung, Zulassungsfragen, sicherheitsrechtliche Fragestellungen etc.)
 - Schaffung von rechtlichen Voraussetzungen, die den Einfluss der Länder und Kommunen auf den Einsatz von AV-Flotten als Mobilitätsangebot sichern
 - Erarbeitung der Regeln der Zulassung von ÖV-Shuttles im öffentlichen Straßenraum im Automatisierungsgrad Stufe 4 mit ÖV-spezifischen Besonderheiten (z.B. Notbremse statt Lenkrad, Teilnetze statt überall...)
- Entwicklung geeigneter Fahrzeugkonzepte für ÖPNV-AV-Ridesharing-Flotten unter Nutzung der Kompetenz der Forschungseinrichtungen (z.B. Hochschulen, DLR, Fraunhofer) und Fahrzeugbauzulieferer im Land in Abstimmung mit den Kunden, ÖV-Unternehmen und Zulassungsbehörden
- Aktualisierung der Infrastrukturplanung des Landes und der Kommunen unter Berücksichtigung des mittelfristigen Einsatzes von ÖPNV-AV-Ridesharing-Flotten

In Ergänzung dieser Fragestellungen zu einem künftigen ÖPNV-AV-Ridesharing sollten sich die ÖPNV-Akteure aus Sicht der Projektpartner in künftigen Projekten zum autonomen Fahren auch mit folgenden Fragestellungen zur weiteren Automatisierung bestehender ÖPNV-Flotten (Schiene/Bus) auseinandersetzen:

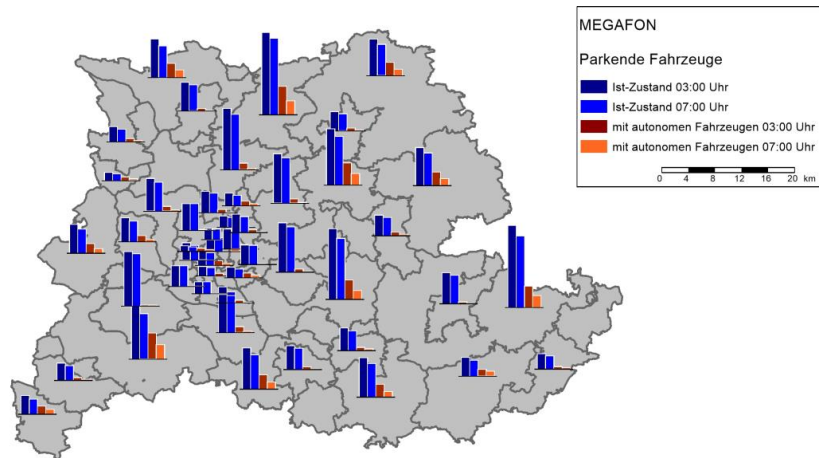
- (Teil)automatisches Fahren in Stadtbahn-/Straßenbahnsystemen auf unabhängigen Trassen, in Wendeanlagen (Zugsicherung etc.) etc.
- (Teil)automatisches Fahren im Busverkehr, im Haltestellenbereich, entlang bestimmter Korridore/Kreuzungsbereiche u.a. Platooning
- Automatisierter Betriebshof Bus/Schiene: automatisierte Arbeitsabläufe und Teilprozesse (z.B. Betankung, Reinigung, Abstellung) auf nicht-öffentlichen Betriebsgeländen

11 Glossar / Definitionen

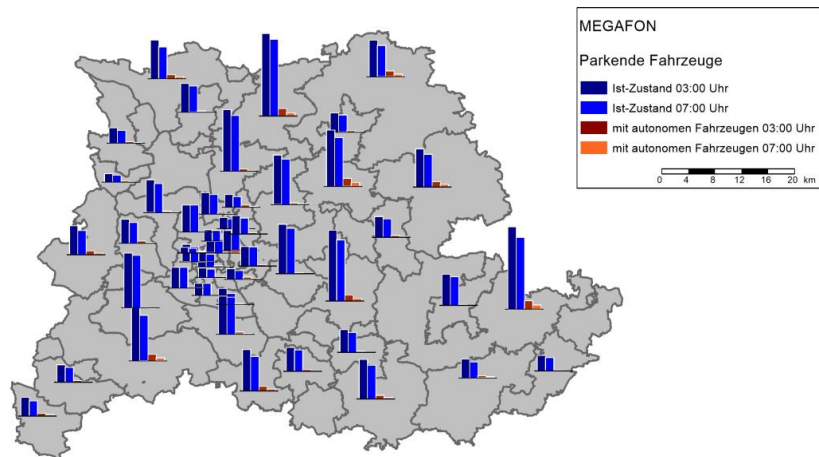
AV	Autonomous Vehicle, fahrerloser Pkw
AV-CS	AV als Carsharing-Fahrzeug genutzt
AV-NS	AV als privates Fahrzeug (NoSharing) genutzt
AV-RS	AV als Ridesharing-Fahrzeug genutzt
CS	Carsharing
Fzgkm	Fahrzeugkilometer
FzgStd	Fahrzeugstunden
NS	NoSharing, Nutzung des AV im Sinne eines privaten Fahrzeug ohne geteilte Nutzung.
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
Pkm	Personenkilometer
Pkw	gängiges Pkw mit einem Fahrer
Pkw-M	Pkw-Mitfahrer
Pkw-S	Pkw-Selbstfahrer
PStd	Personenstunden
RS	Ridesharing
Bahn	Verkehrsmittel mit Schienenweg wie Fern- und Regionalzug, S-Bahn, Stadtbahn, Tram
mBahn/oBahn	Szenarien mit Bahn/Szenarien ohne Bahn
Lastkilometer	Fahrzeugkilometer der AV mit Beförderung von Personen
Lastzeit	Fahrzeugstunden der AV mit Beförderung von Personen
Leerkilometer	Fahrzeugkilometer der AV ohne Beförderung von Personen, die beim Umsetzen der Fahrzeuge auftreten
Leerzeit	Fahrzeugstunden der AV ohne Beförderung von Personen, die beim Umsetzen der Fahrzeuge auftreten
Wartezeit	Zeit zwischen zwei Fahrzeugfahrten
Standzeit	24 Stunden abzüglich der Last-, Leer- und Wartezeit
heutiger Zustand	beschreibt einen Zustand ohne AV, der nachfrageseitig der Nachfrage im Jahr 2010 entspricht. Dieser Zustand dient als Bezugsfall für die Vergleiche in den Zuständen mit AV
Zustand mit AV	beschreibt einen Zustand mit AV, in dem das Busangebot komplett entfällt. Der Zustand mit AV für 9 Szenarien beschrieben.

12 Anhang

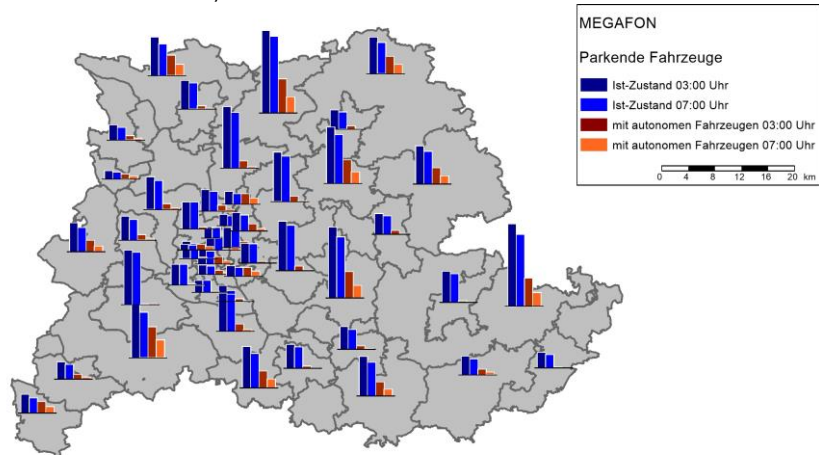
12.1 Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge VRS



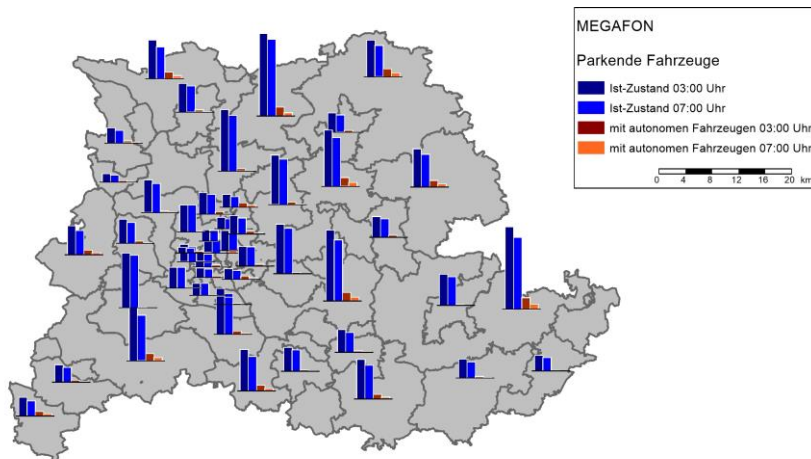
Szenario 1: 0% AV-NS, 100% AV-CS mit Bahn



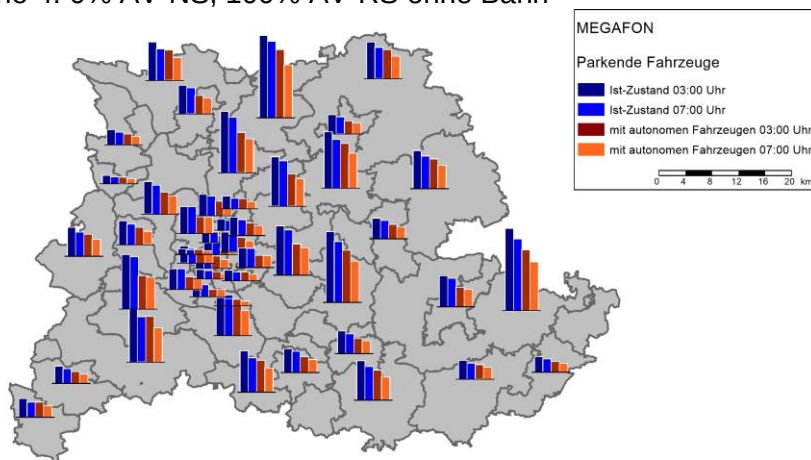
Szenario 2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn



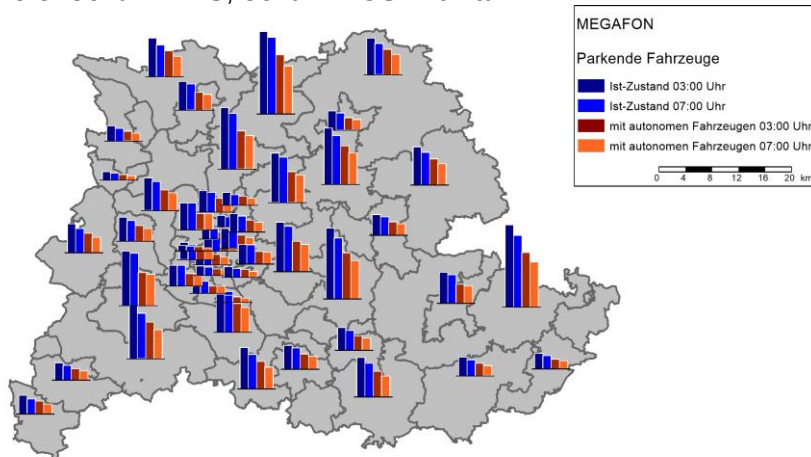
Szenario 3: 0% AV-NS, 100% AV-CS ohne Bahn



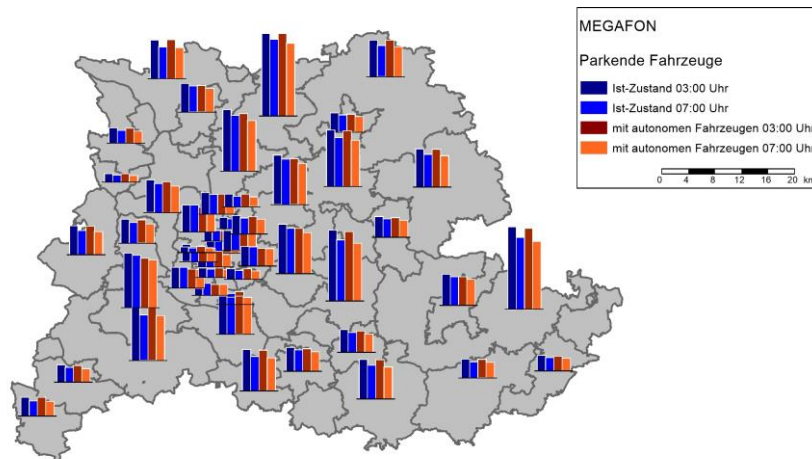
Szenario 4: 0% AV-NS, 100% AV-RS ohne Bahn



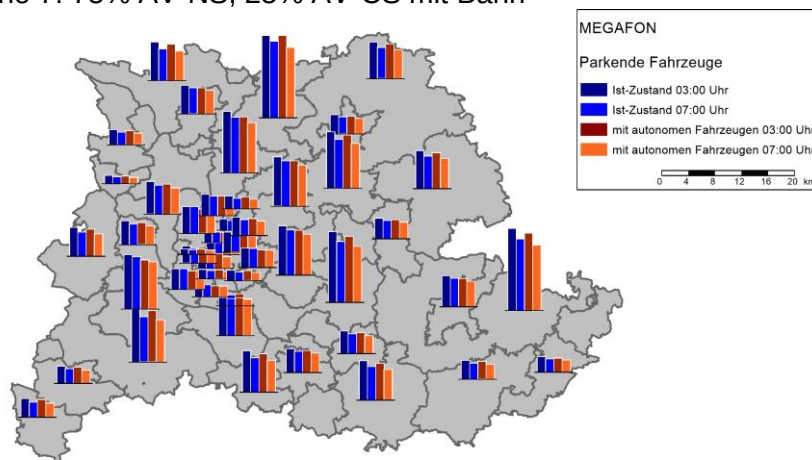
Szenario 5: 50% AV-NS, 50% AV-CS mit Bahn



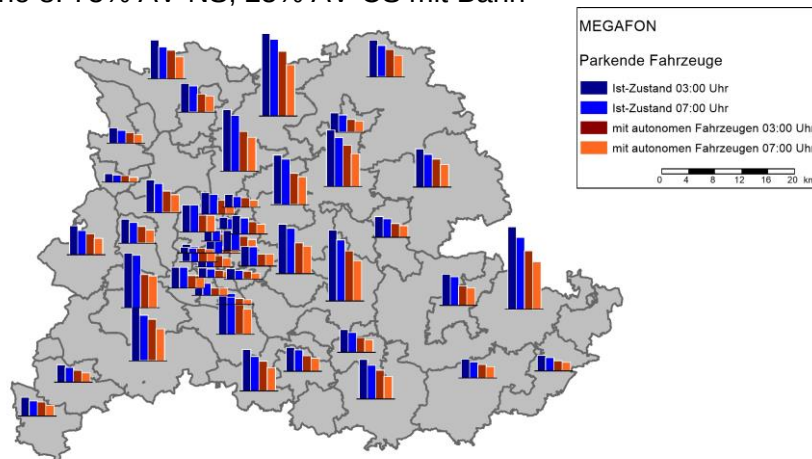
Szenario 6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn



Szenario 7: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn

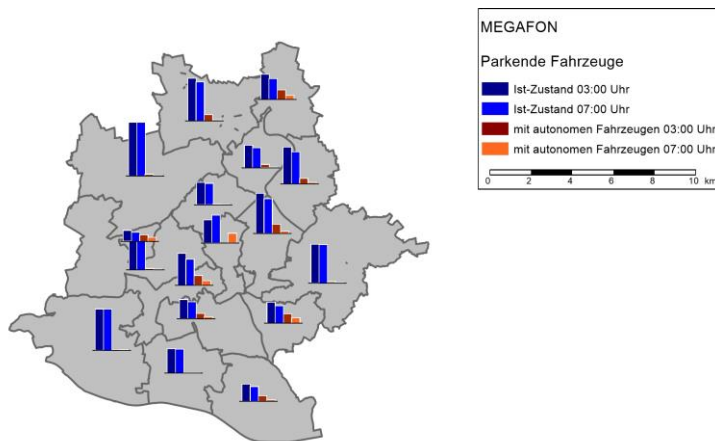


Szenario 8: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn

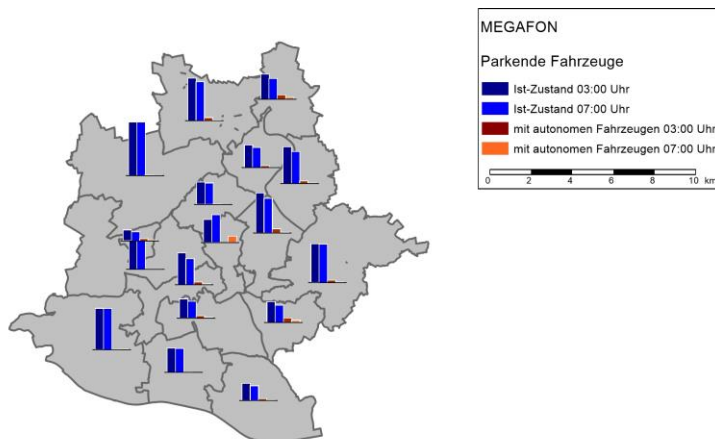


Szenario 9: 50% AV-NS, 50% AV-CS, 50% AV-RS mit Bahn

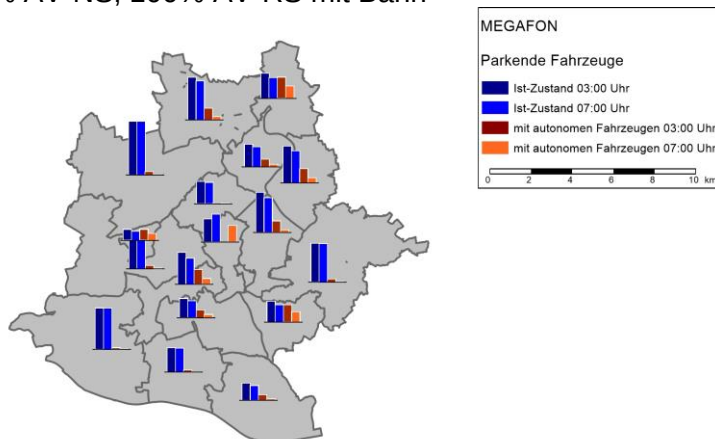
12.2 Räumliche Verteilung parkender Fahrzeuge LHS



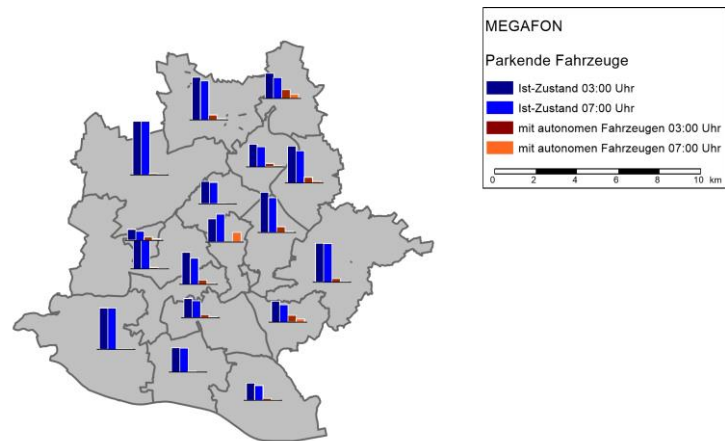
Szenario 1: 0% AV-NS, 100% AV-CS mit Bahn



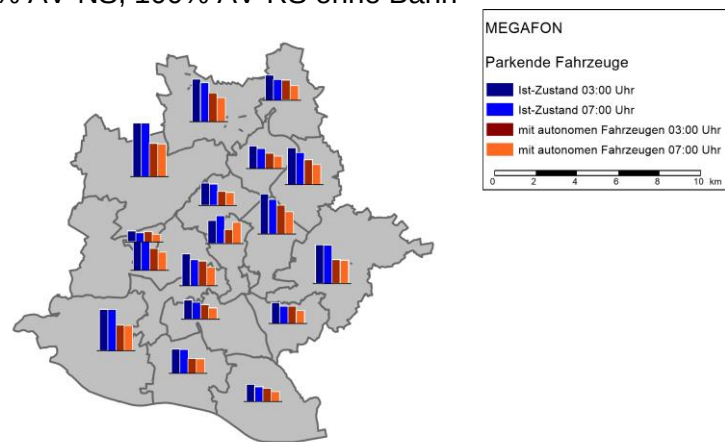
Szenario 2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn



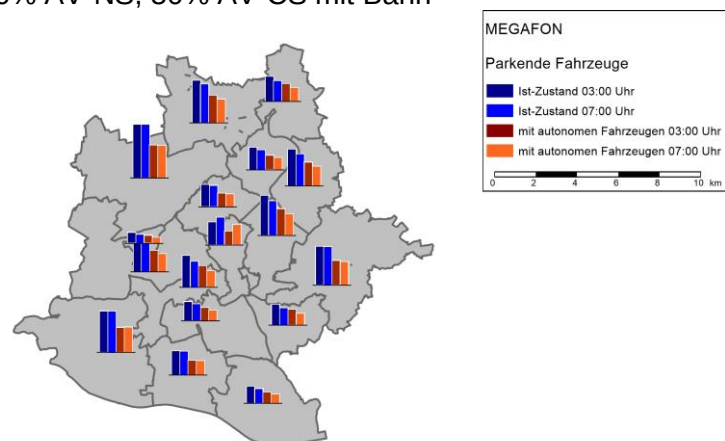
Szenario 3: 0% AV-NS, 100% AV-CS ohne Bahn



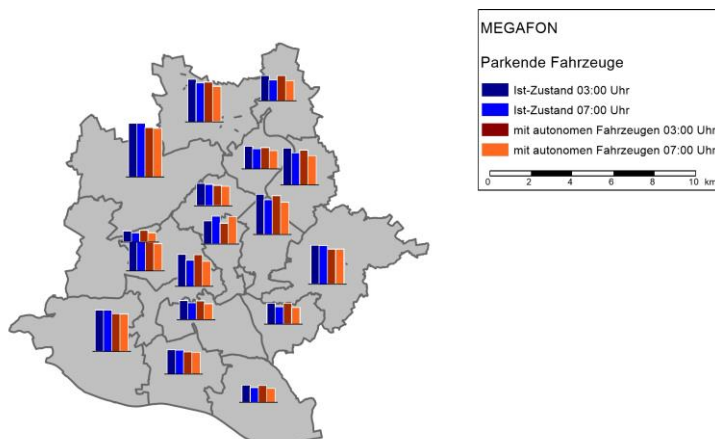
Szenario 4: 0% AV-NS, 100% AV-RS ohne Bahn



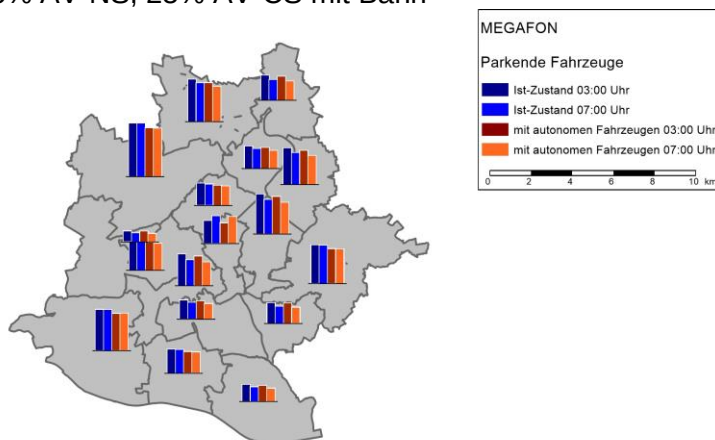
Szenario 5: 50% AV-NS, 50% AV-CS mit Bahn



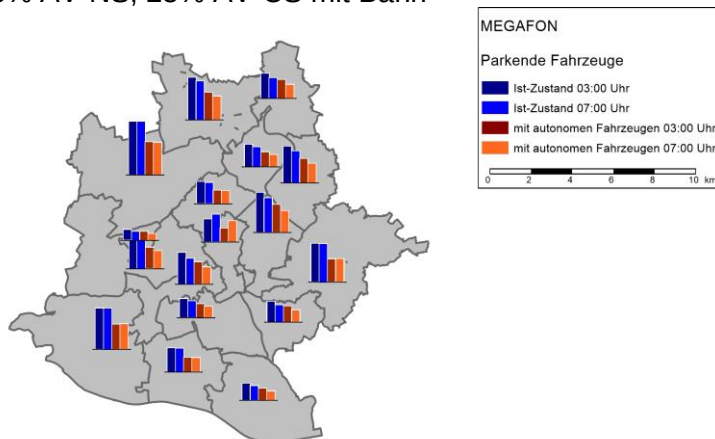
Szenario 6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn



Szenario 7: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn

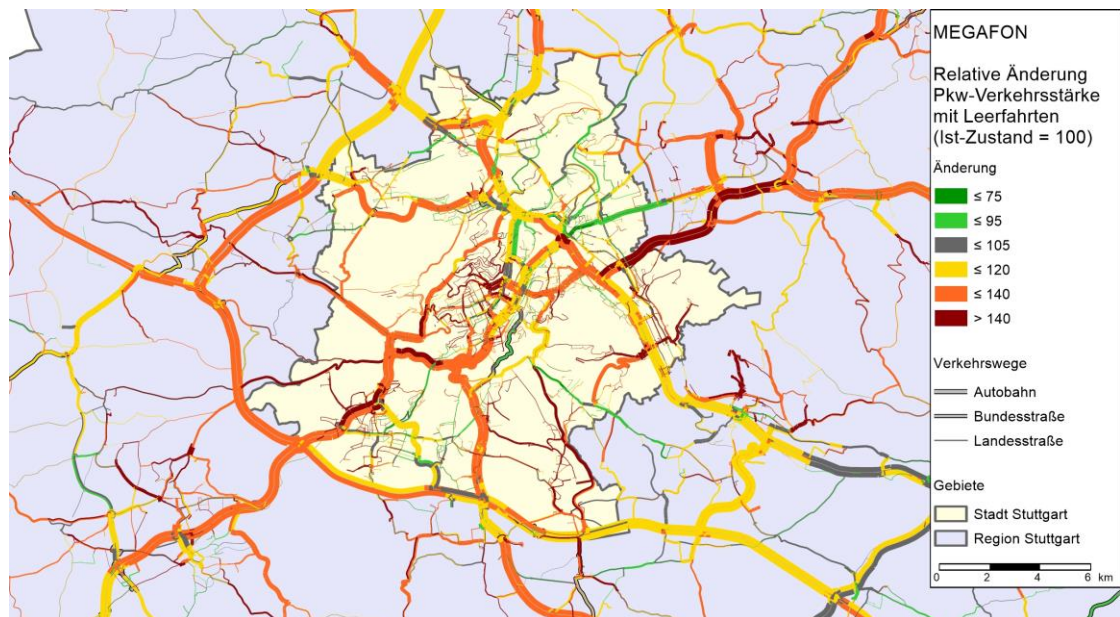


Szenario 8: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn

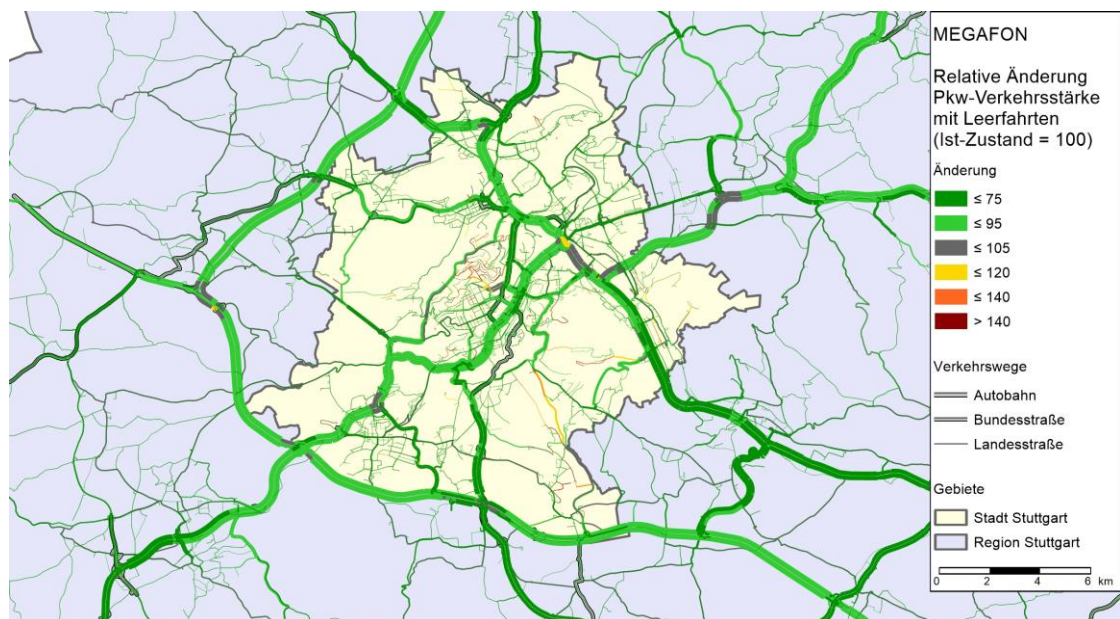


Szenario 9: 50% AV-NS, 50% AV-CS, 50% AV-RS mit Bahn

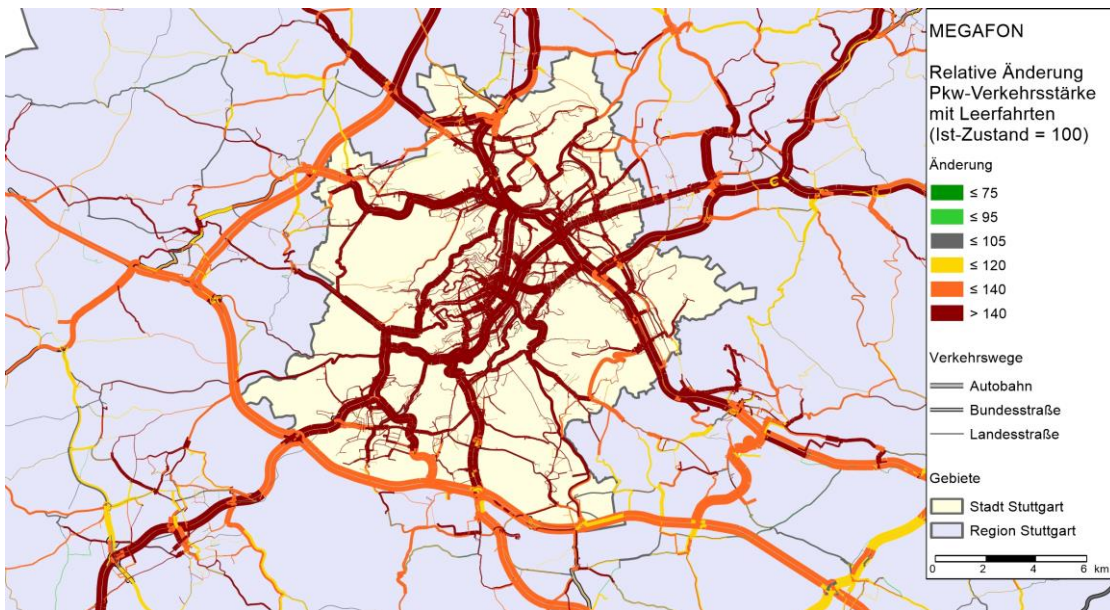
12.3 Relative Änderung der Belastungen im Zentrum



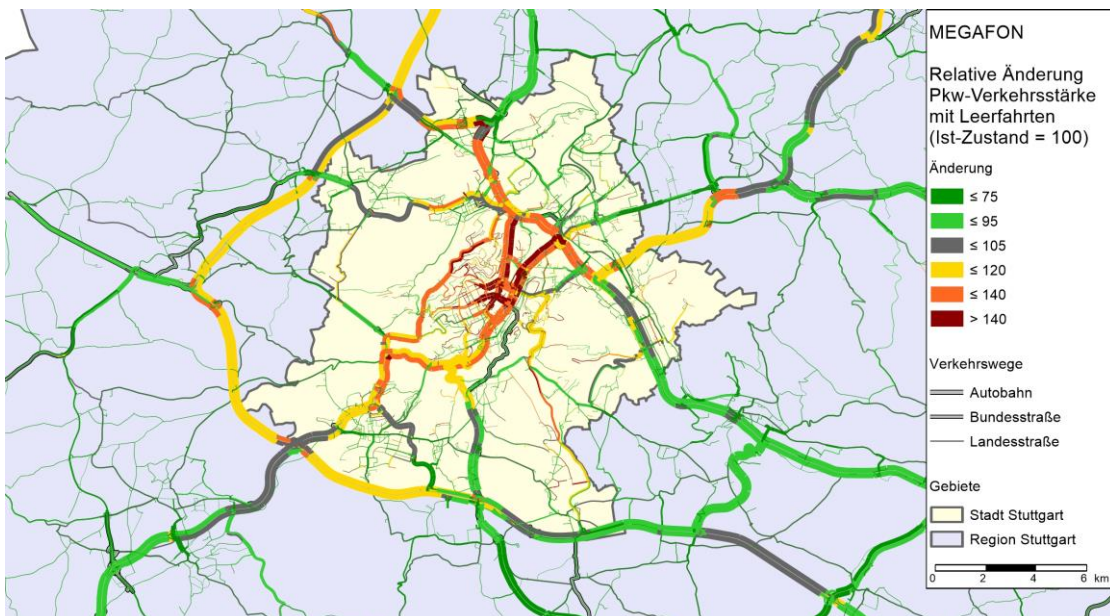
Szenario 1: 0% AV-NS, 100% AV-CS mit Bahn



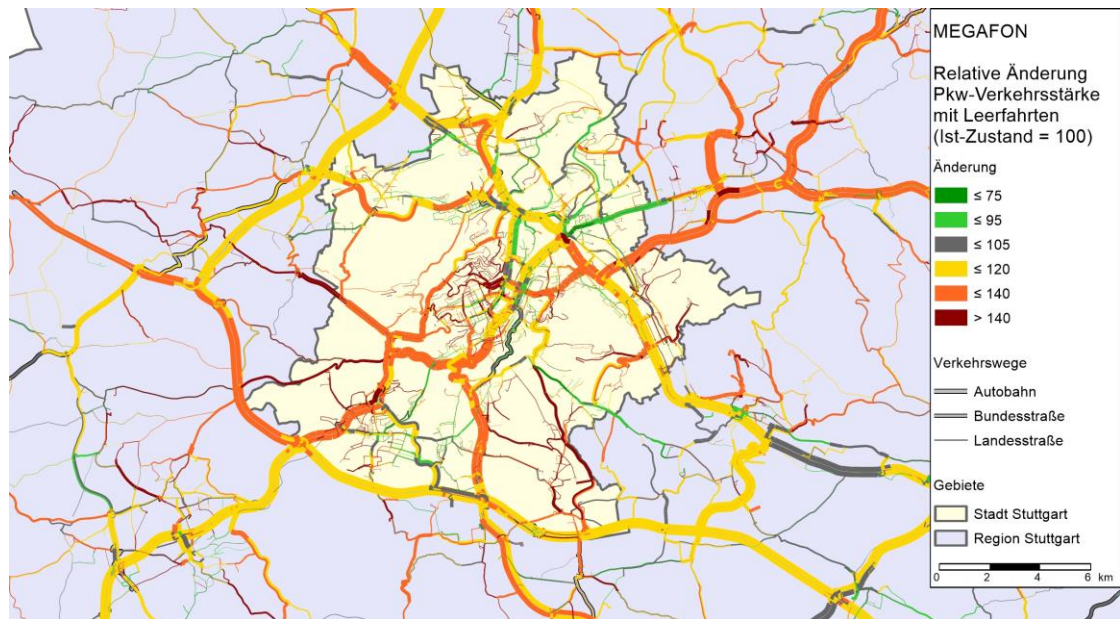
Szenario 2: 0% AV-NS, 100% AV-RS mit Bahn



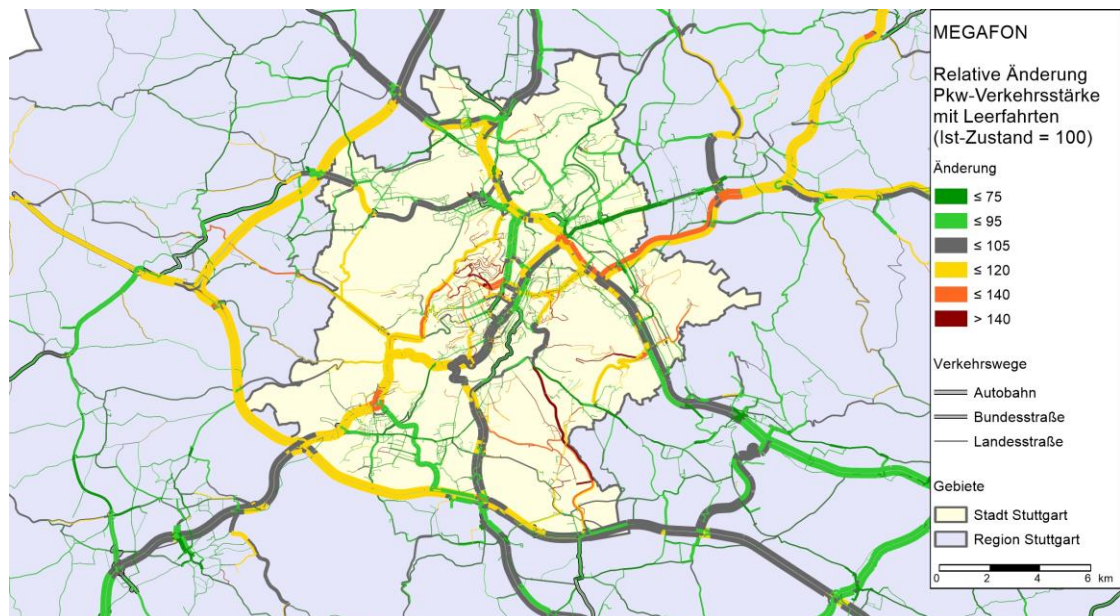
Szenario 3: 0% AV-NS, 100% AV-CS ohne Bahn



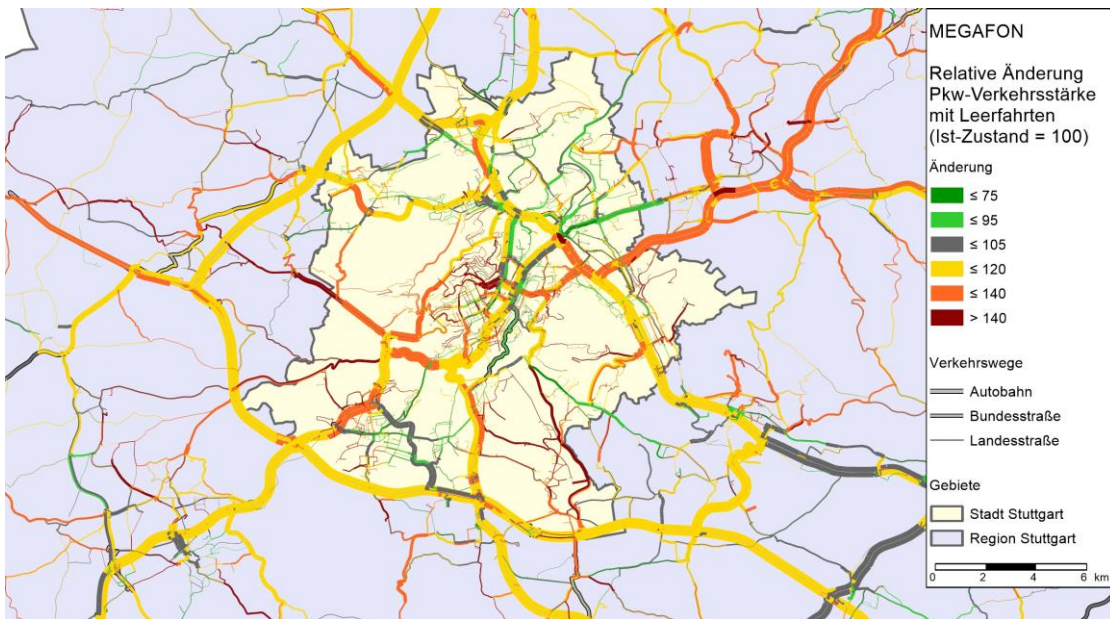
Szenario 4: 0% AV-NS, 100% AV-RS ohne Bahn



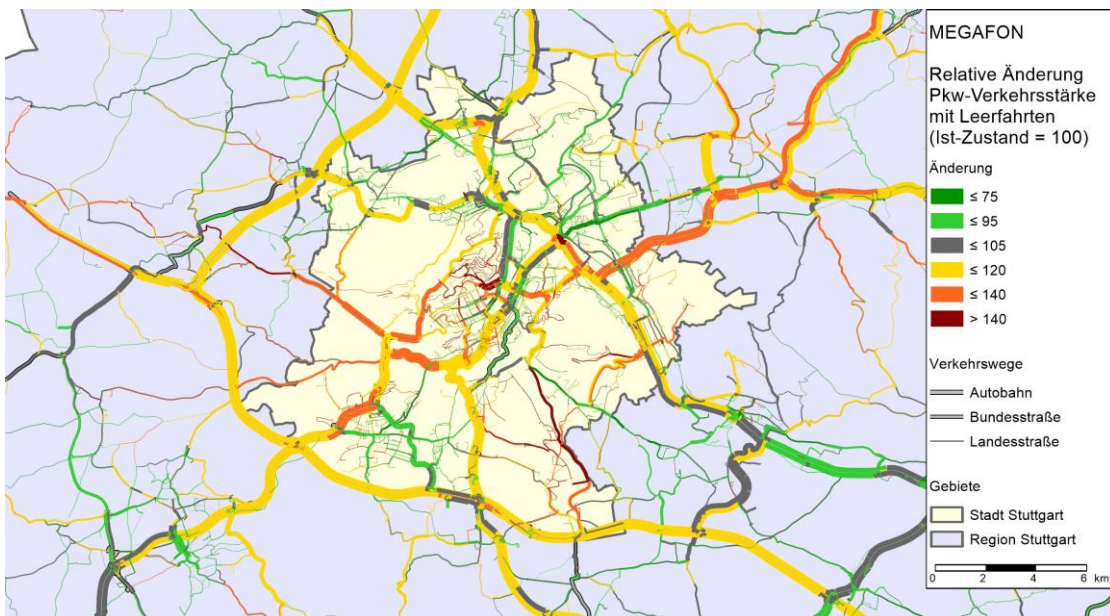
Szenario 5: 50% AV-NS, 50% AV-CS mit Bahn



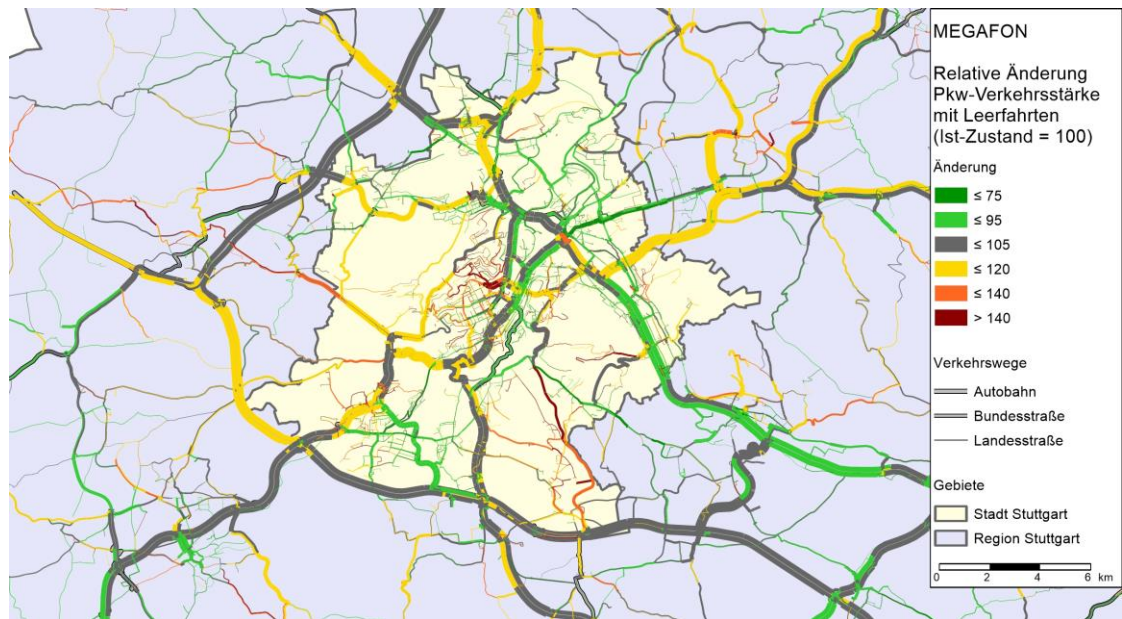
Szenario 6: 50% AV-NS, 50% AV-RS mit Bahn



Szenario 7: 75% AV-NS, 25% AV-CS mit Bahn



Szenario 8: 75% AV-NS, 25% AV-RS mit Bahn



Szenario 9: 50% AV-NS, 25% AV-CS, 25% AV-RS mit Bahn

13 Literaturverzeichnis

Fraunhofer IAO (2015):

Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/S-T/studie-management-summary,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 31.08.2016.

Friedrich, B. (2015):

Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In *Autonomes Fahren* (pp. 331-350). Springer Berlin Heidelberg.

Hazan, J., Lang, Ulrich, P., Chua, J., Doubara, X., Steffens, T. (2016):

Will Autonomous Vehicles Derail Trains?, The Boston Consulting Group

Online verfügbar unter

<https://www.bcgperspectives.com/content/articles/transportation-travel-tourism-automotive-will-autonomous-vehicles-derail-trains/>, zuletzt geprüft am 06.01.2017.

Isaac, L. (2015):

Driving Towards Driverless – A guide for government agencies. WSP Parsons Brinckerhoff

MiD (2008):

Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Online verfügbar unter http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2016.

OECD, International Transport Forum (2015):

Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic.

Roland Berger GmbH (2014):

Autonomous Driving. disruptive innovation that promises to change the automotive industry as we know it — it's time for every player to think:act! In: Think Act. Online verfügbar unter

https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_tab_autonomous_driving.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2016.

VDV (2015):

Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge - Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen, Positionspapier