

MASTERARBEIT

MAKROSKOPISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEITSBETRACHTUNG AUTOMATISIERT FAHRENDER FAHRZEUGE



VORGELEGT VON:

Schüttenkopf Ingo, BSc

BETREUER:

Univ. - Prof. Dr. - Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

MITBETREUENDE ASSISTENTEN:

Dipl. - Ing. Robert Neuhold

Dipl. - Ing. Michael Haberl, BSc

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, am 20. November 2017

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008 Genehmigung des Senats am 01.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

Graz, _____

Ingo Schüttenkopf, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. This document is identical with the electronic version uploaded via TUGRAZonline.

Graz, _____

Ingo Schüttenkopf, BSc.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Fellendorf, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei den beiden Assistenten Robert Neuhold und Michael Haberl, die mich tatkräftig unterstützt und viel Interesse und Hilfsbereitschaft geleistet haben, bedanken. Auch bin ich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt, sehr dankbar.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die über mein gesamtes Studium ein offenes Ohr für meine Sorgen und Probleme hatten. Vor allem möchte ich meinen Eltern danken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Ingo Schüttenkopf,

Graz, 18.10.2017

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Ingo Schüttenkopf

Graz, am 08.02.2017

Makroskopische Leistungsfähigkeitsbetrachtung automatisiert fahrender Fahrzeuge

Problemstellung

Autonome Fahrzeuge bieten neue Chancen der Mobilität. Den Menschen, die bis dato in der Mobilität beschränkt waren und nicht bzw. eingeschränkt am öffentlichen Leben teilhaben konnten, wird durch die Autonomie neue Möglichkeiten gegeben. Aber auch der gesellschaftliche Nutzen muss im Vordergrund stehen. Autonome sowie automatisierte Fahrzeuge sollen unter anderem die Sicherheit und die Effizienz im Straßenverkehr nicht nur im gleichen Maß halten, sondern diese auch verbessern.

Aus verkehrlicher Sicht sind die Einflüsse der automatisierten Fahrzeuge auf die Kapazität und den Verkehrsfluss einer Strecke relevant. Neben der Erhöhung der Durchflussraten kann das automatisierte Fahren aber auch einen wesentlichen Beitrag im Hinblick auf Effizienz und Wirtschaftlichkeit, ökologische Nachhaltigkeit, Entlastung und Komfort und die Sicherheit im Straßenverkehr beitragen. Die Effizienz von Verkehrsanlagen wird mit der Kapazität beschrieben. Diese ist wiederum vom maximal möglichen Verkehrsfluss abhängig. Auf Autobahnabschnitten ist für die Kapazität die Instabilität bestimmend, die sich bei hohen Auslastungsgraden einstellt und zu einem Stau führen kann. Auf dem hochrangigen Streckennetz ist die Kapazität im Wesentlichen durch den maximal möglichen Verkehrsfluss auf den Streckenabschnitten sowie die maximal möglichen Verflechtungs- und Ein- bzw. Ausfädelungsverkehrsstärken an den planfreien Knotenpunkten bestimmt.

Bei einer Nutzung der Verkehrsanlage durch autonom bzw. automatisiert fahrende Fahrzeuge wird sich die Kapazität gegenüber einer Nutzung durch menschliche Fahrer verändern. Der Fahrkomfort geht aber dadurch nicht verloren, da die Antizipation der Aktionen zum Vordermann gesichert wird. Auch die konstante Geschwindigkeit im Pulk führt zu weniger Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, was zu einem harmonischen Verkehrsfluss führt. Die Geschwindigkeit spielt auch eine wichtige Rolle in der Kapazitätserhöhung. Hohe Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Dichte können von autonomen Fahrzeugen gefahren werden. Kaum wird ein Fahrzeug von einem Menschen gesteuert, kommt es zu Einbußen in der Kapazitätsgewinnung.

Erste Abschätzungen der Wirkung autonomer bzw. automatisierter Fahrzeuge auf die Kapazität als Maß für die Effizienz von Verkehrsanlagen zeigen signifikante Steigerungspotenziale. Die ersten entwickelten Modelle für den Verkehrsfluss und die Kapazität unter Berücksichtigung eines Anteils autonomer Fahrzeuge zeigen, dass die Kapazität mit dem Anteil dieser Fahrzeuge überproportional anwächst. Dabei ist zu bemerken, dass die Verkürzung der Zeitlücken schon ab dem ersten Fahrzeug wirkt, die Steigerung der Geschwindigkeit bei hohen Dichten hingegen nur für rein autonomen Verkehr und damit bei höheren Ausstattungsraten möglich sein wird. Die Schwierigkeit ist aber, dass man nicht vorhersehen kann mit welchem prozentuellen Anteil die einzelnen SAE – Stufen auf den Straßen unterwegs sein werden. Hier müssen verschiedene Szenarien für den Mischverkehr mit mehreren Marktdurchdringungen durchgespielt werden.

Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist eine vertiefte Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Automatisierungsgrade auf eine mögliche Leistungsfähigkeitserhöhung am hochrangigen Streckennetz. Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Masterarbeit. Abweichungen sind mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung möglich:

- Literaturrecherche zum Thema Kapazität von automatisierten und autonomen Fahrzeugen auf hochrangigen Straßennetzen. Dabei soll auf unterschiedliche Stufen der Automatisierung eingegangen werden und auch speziell der Mischverkehr analysiert werden.
- Vertiefte Beschäftigung mit Widerstandsfunktionen und Berücksichtigung von Kapazitätsveränderungen durch automatisierte Fahrzeuge
- Aufbauend auf Daten aus mikroskopischen Verkehrsflussanalysen sollen die Möglichkeiten einer Abschätzung und Kalibrierung von Kapazitäts- und Widerstandsfunktionen aufgezeigt werden.
 - Entsprechend der Erkenntnisse der Änderung der Widerstandsfunktionen sollen bestehende makroskopische Netzmodelle adaptiert und diverse Infrastrukturszenarien aufgebaut werden.
 - Es kommt zur simulativen Durchführung und anschließender Analyse mehrerer Testszenarien unter Einfluss unterschiedlicher Penetrationsraten der SAE-Level. Dabei konzentrieren sich die Analysen auf Kapazitätsbewertungen von einzelnen Streckensegmenten aber auch am Gesamtnetz des hochrangigen Streckennetzes der ASFINAG.

Es kann zu Abweichungen dieser Bearbeitungspunkte mit fortschreitendem Erkenntnisstand kommen. Die Bearbeitung dieser Masterarbeit erfolgt primär mit der Verkehrsprognosesoftware VISUM und mit der Statistiksoftware R-PROJECT. Diese Programme werden vom Institut für Straßen- und Verkehrswesen zur Verfügung gestellt.

Die Arbeit ist zweifach in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit allen wichtigen Modelldaten und Ergebnissen ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
 Tel. 0316 873 6220
martin.fellendorf@tugraz.at
 Betreuer

Dipl.-Ing. Michael Haberl
 Tel. 0316 873 6226
michael.haberl@tugraz.at
 Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Automatisierte Fahrzeuge werden in naher Zukunft eine große Rolle in unserer Gesellschaft spielen. Auch die Straßenbetreiber forcieren die Forschung von der Auswirkung dieser Fahrzeuge auf die jetzige Infrastruktur. In der vorliegenden Arbeit wird auf die mögliche Änderung der Leistungsfähigkeit durch automatisierte Fahrzeuge auf das hochrangige Streckennetz (A+S) in Österreich behandelt. Um dies weitestgehend zu untersuchen, werden Simulationen im mikroskopischen Bereich anhand typischer Netzelemente auf Autobahnen durchgeführt. Mit diesen Daten werden Kapazitäten, die die Leistungsfähigkeit beschreiben, und Widerstandsfunktionen, die die aktuelle Reisezeit abhängig von der Verkehrsbelastung beschreiben, für verschiedene Geschwindigkeiten und Anzahl von Fahrstreifen ermittelt. Letztendlich werden diese Erkenntnisse in das makroskopische Netz eingebracht, um verkehrliche Kenngrößen zu ermitteln, damit man den Unterschied zu den automatisierten Fahrzeugen begreiflich machen kann. Die Ergebnisse zeigen, dass es durch Wegfall der menschlichen Komponente im Straßenverkehr eine Erhöhung der Kapazität auf freien Strecken von 27%, jedoch bei den Autobahnanschlussstellen (Auf- und Abfahrten) sogar eine Verminderung in manchen Szenarien von maximal 7,5% vorliegt. Im Mittel über alle Szenarien gibt es aber auch hier wieder eine Erhöhung von rund 11%. Die Widerstandsfunktionen, wie sie zur Zeit vorliegen, sind für die Abbildung des automatisierten Fahrens nicht geeignet. Das makroskopische Verkehrsmodell des hochrangigen Streckennetzes Österreichs zeigt großteils positive und teils negative Wirkungen des hochautomatisierten Fahrens auf das gesamte Streckennetz. Die Reisezeit von Innsbruck nach Linz, um hier nur ein Beispiel aufzuzählen, vermindert sich in der Morgenspitze von 07:00 bis 08:00 um 13 min. Auch in den weiteren Stunden, die im Zuge dieser Arbeit untersucht werden, sind Reisezeiteinsparungen zu sehen. Auch bei LOS, das für die Klassifizierung der Auslastung zuständig ist, ist ein positiver Effekt des hochautomatisierten Fahrens (SAE 4) zu sehen. Durch die doch deutliche Kapazitätserhöhung auf den freien Strecken ist aber auch eine Zunahme der Fahrleistung auszumachen. Hier steigt beispielsweise in Wien die Summe der Fahrzeugkilometer pro Tag um 30% an. Für die Zukunft wird es wichtig sein, neue CR - Funktionen zu finden, um das automatisierte Fahren besser abbilden zu können. Auch wird es sehr wichtig sein, dass man weitere Analyse mit gemischten Automatisierungsgraden durchführt, da in den nächsten Jahren der Mischverkehr der unterschiedlichen SAE - Levels ein großes Thema auf den Autobahnen sein wird.

Abstract

Automated vehicles will play a big part in our near future. So road operators are forcing research to analyse the impact of these vehicles on the current road infrastructure. This research deals with possible changes in the capacity of motorways. Therefore, microscopic traffic flow simulations were conducted with common and automated vehicles on typical motorway segments. Based on the simulation output data road capacities and volume - delay - functions were estimated and implemented afterwards in a transport model for the Austrian motorway - network. The macroscopic impact of automated vehicles were analysed by comparing the results of non- and highly automated vehicles in the transport model. The results of microscopic simulations showed that capacity increases with automated vehicles by 27% on linear road segments, but decreases at some specific scenarios at motorway junctions by 7.5%. Overall the motorway junctions show also a increase of 11%. The volume - delay - functions, established from the microscopic simulation output data, are unfeasible to describe the characteristics of automated vehicles. Microscopic simulations from the highway network of Austria show positive but also negative aspects of highly - automated vehicles on the road network overall. The actual travel time in the morning hours from Innsbruck to Linz for example is reduced by 13 minutes. Also in the other hours, which are being reviewed, are reductions of the travel time. The Level of Service, which is the classification of the degree of capacity utilisation, shows an improvement of one entire level. By increased capacities the kilometres travelled is going up, which is a little negative aspect of automated vehicles. For example kilometres travelled per day in Vienna is increased by 30%. For the future it will be very important that new volume - delay - functions will be found to better display the driving of automated vehicles. Continuing analysis with mixed levels of automation will be important as well because the mixed traffic of different SAE - levels will be a big topic on the motorway for the next years.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Problemstellung	5
1.2	Ziel der Arbeit	6
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Stufen der Automatisierung	8
2.2	Wirkung des automatisierten Fahrens	10
2.3	Kapazitätsbeschränkungsfunktionen	21
2.4	Verkehrsumlegung in makroskopischen Verkehrsmodellen	24
2.4.1	Sukzessivumlegung	24
2.4.2	Gleichgewichtsumlegung	25
2.4.3	Lernverfahren	26
2.4.4	Zusammenfassung der einzelnen Verfahren	27
3	Methodik	28
3.1	Vorgehensweise	28
3.2	Ermittlung der Kapazität	29
3.2.1	Kapazitätsbestimmung nach RVS	29
3.2.2	Ermittlung mittels Fundamentaldiagramm	30
3.2.3	Vorgehen bei der Bestimmung der Kapazität	37
3.2.4	Simulationsszenarien im mikroskopischen Verkehrsmodell	38
3.3	Auswertung der CR - Kurven	44
4	Adaptierung des Verkehrsmodells	51
4.1	Untersuchung der Fahrstreifenanzahl	51
4.2	Ausbau und Erweiterungen	53
4.3	Einfügen typischer Netzelemente	55
4.4	Belastungsverhältnisse	58
4.5	SV - Anteil	58
4.6	CR - Funktionen	59
4.7	Ermittlung des γ Wertes	60
4.8	Makroskopische Kenngrößen	66

5	Ergebnisse	68
5.1	Kapazität für typische Streckenabschnitte	68
5.1.1	Lage der Auswertequerschnitte	68
5.1.2	Ergebnisse der Kapazitätsermittlung für freie Strecken	69
5.1.3	Ergebnisse der Kapazitätsermittlung bei Anschlussstellen	71
5.2	Streckentypfeine CR - Kurven	74
5.2.1	CR - Funktionen für 2 - streifigen Streckenabschnitt	75
5.2.2	CR - Funktionen für 3 - streifigen Streckenabschnitt	77
5.2.3	CR - Funktionen für 4 - streifigen Streckenabschnitt	78
5.3	Makroskopische Untersuchung	79
6	Zusammenfassung	88

Abbildungsverzeichnis

2.1	SAE - Levels (vgl. [2])	8
2.2	Darstellungsformen des Fundamentaldiagramms nach Schick (vgl.[4])	11
2.3	Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm	12
2.4	Kapazitätszuwachs bei ausschließlich autonom fahrenden Fahrzeugen (vgl.[1])	13
2.5	Änderung der Kapazität mit variierender Prozentzahl bei 100 km/h (vgl. [6])	14
2.6	Abstands- bzw. Kapazitätsänderungen bei unterschiedlicher Geschwindigkeit (vgl. [6])	14
2.7	Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit der Penetrationsrate (vgl.[1])	15
2.8	Abstandsverhalten im Mischverkehr (vgl.[7])	16
2.9	Kapazitätsänderung von einer Einfahrt (vgl.[7])	17
2.10	Kapazitätsänderung auf den freien Strecken (vgl.[7])	17
2.11	Änderung des Auslastungsgrades zufolge kHAF (vgl.[7])	18
2.12	Untersuchte Strecken in Texas (vgl.[8])	19
2.13	Ergebnisse der I35 (vgl.[8])	20
2.14	Ergebnisse der US - 290 (vgl.[8])	20
2.15	Funktionsunterschied zwischen BPR und Conical - Spiess	23
2.16	Ablaufschema der Gleichgewichtsumlegung (vgl. [13])	25
2.17	Beispiel für den Ablauf des statischen Lernverfahrens (vgl. [14])	27
3.1	Flussdiagramm zur Methodik dieser Arbeit	28
3.2	Kapazität eines 2 - streifigen Querschnitts auf der A4 anhand realer Messdaten (vgl. [16])	31
3.3	Ausschnitt aus einer *.mer - Datei	32
3.4	Kapazität C auf Basis der Daten im k - v - Diagramm	33
3.5	Transformation der Kurve in die q - v - Ebene	33
3.6	Kapazität C auf Basis der Daten im q - v - Diagramm	34
3.7	Unterschied der SAE - Levels bei Kapazitätsermittlung	35
3.8	Variantenunterschied in der Kapazitätsermittlung	36
3.9	Unterteilung der Datenpunkte in die einzelnen Verkehrsdichteklassen	36
3.10	Variantenunterschied in der Kapazitätsermittlung für das Netzelement 2 - 1RA	37
3.11	Simulierte typische Netzelemente	39
3.12	Belastungsverhältnisse einer Einfahrt 2+1RE	44
3.13	Ablaufschema zur Schätzung von CR - Funktionen	44
3.14	Unterschied der beiden Varianten bei der Ermittlung von CR - Funktionen	46
3.15	CR - Funktionen eines 4 - streifigen Querschnittes (SAE 4)	47

3.16	CR - Funktionen anhand eines 4 - streifigen Querschnittes (SAE 4)	48
3.17	Erforderte vs. beobachtete Verkehrsstärke/Kapazität Ratio (vgl. [19])	49
3.18	CR - Funktionen anhand beobachteter und erforderter Datenpunkte (vgl. [19])	50
4.1	A+S Netz Österreichs mit der Anzahl der Fahrstreifen	52
4.2	Streckenverlauf der S1 nach UVE	53
4.3	Änderungen im Verkehrsmodell	54
4.4	Modellierung Knoten Wiener Neustadt vorher	56
4.5	Modellierung Knoten Wiener Neustadt nachher	57
4.6	Zuordnungen der Netzelemente im Streckennetz Österreichs	57
4.7	Einteilung des A+S Netzes in die G - Stufen	58
4.8	SV - Anteile auf dem A+S Netzes Österreichs	59
4.9	Matrix für die CR - Funktionen in VISUM	60
4.10	Ganglinie mehrerer Querschnitte der A2 von Graz in Fahrtrichtung Lassnitzhöhe (absolute Werte)	61
4.11	Ganglinie mehrerer Querschnitte der A2 von Graz in Fahrtrichtung Lassnitzhöhe (relative Werte)	62
4.12	Überblick der Verfahren für eine Clusteranalyse	63
4.13	Clustereinteilung für A + S Netz Österreich	64
4.14	mittlerer Cluster 4 für das Verkehrsmodell	64
4.15	Clustereinteilung des Straßennetzes in Österreich	65
5.1	Aufbau eines 2 - streifigen Streckenabschnittes in der Mikrosimulation	68
5.2	Aufbau des typischen Netzelementes 2+1RE	68
5.3	Aufbau des typischen Netzelementes 2-1RA	69
5.4	Kapazitätsänderung am 2-streifigen Streckenabschnitt	69
5.5	Kapazitätsänderung am 3-streifigen Streckenabschnitt	70
5.6	Kapazitätsänderung am 4-streifigen Streckenabschnitt	70
5.7	Kapazitätsänderung bei freien Strecken	71
5.8	Kapazitätsänderung bei Netzelement 2+1RE (MQ „Beginn Verflechtung“)	71
5.9	Kapazitätsänderung bei Netzelement 3+1RE (MQ „Beginn Verflechtung“)	72
5.10	Kapazitätsänderung bei Netzelement 2+1RE (MQ „Ende Verflechtung“)	73
5.11	Kapazitätsänderung bei Netzelement 3+1RE (MQ „Ende Verflechtung“)	73
5.12	Kapazitätsänderung bei allen Netzelementen über beide Querschnitte	74
5.13	CR - Funktionen anhand eines 2 - streifigen Querschnittes	75

5.14	CR - Funktionen anhand eines 3 - streifigen Querschnittes	77
5.15	CR - Funktionen anhand eines 4 - streifigen Querschnittes	78
5.16	Auslastungsgrad: SAE 0 von 07:00 bis 08:00	80
5.17	Auslastungsgrad: SAE 4 von 07:00 bis 08:00	80
5.18	Auslastungsgrad: SAE 0 von 12:00 bis 13:00	83
5.19	Auslastungsgrad: SAE 4 von 12:00 bis 13:00	83
5.20	Boxplot (07:00 Uhr bis 08:00 Uhr)	84
5.21	Boxplot (12:00 Uhr bis 13:00 Uhr)	85
5.22	Raumtypen in Österreich	87
6.1	Auslastungsgrad: SAE 0 von 17:00 bis 18:00	97
6.2	Auslastungsgrad: SAE 4 von 17:00 bis 18:00	97
6.3	Boxplot (17:00 Uhr bis 18:00 Uhr)	98
6.4	Auslastungsgrad: SAE 0 von 21:00 bis 22:00	99
6.5	Auslastungsgrad: SAE 4 von 21:00 bis 22:00	99
6.6	Boxplot (21:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	100

Tabellenverzeichnis

3.1	Abminderung der Leistungsfähigkeit aufgrund der Steigung	29
3.2	Leistungsfähigkeit von Richtungsfahrbahnen mit Steigungen bis zu 2%	30
3.3	9 Szenarien unterteilt in Geschwindigkeit und SV - Anteil	40
3.4	27 Szenarien unterteilt in Geschwindigkeit, SV - Anteil und Belastungsklassen	41
3.5	Übersicht der Belastungsverhältnisse	42
3.6	gemittelte Belastungsverhältnisse	43
4.1	Anzahl, Länge und Kapazitätswerte in VISUM mit Vergleich anderer Richtlinien	52
4.2	Auflistung der Änderungen	54
4.3	Anzahl, Häufigkeit und Länge der Netzelemente im Streckennetz Österreichs	55
4.4	Prozentualen Anteile ausgewählter Stundenwerte auf den gesamten Tag	65
4.5	LOS - Stufen	67
5.1	Parameterwerte von CR - Funktionen des 2 - streifigen Streckenabschnittes	76
5.2	gemittelte Werte der Parameterschätzung von CR - Funktionen des 3 - streifigen Streckenabschnittes	77
5.3	gemittelte Werte der Parameterschätzung von CR - Funktionen des 4 - streifigen Streckenabschnittes	79
5.4	Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (07:00 bis 08:00)	81
5.5	Anteil der Rampen an LOS (07:00 bis 08:00)	81
5.6	Auslastungsgrad typischer Netzelemente an Anschlussstellen im A+S - Netz Österreich	82
5.7	Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (12:00 bis 13:00)	84
5.8	Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 07:00 bis 08:00	86
5.9	Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 12:00 bis 13:00	86
5.10	Vergleich Fahrzeugkilometer pro Tag anhand unterschiedlicher Gebiete	87
6.1	Streckentypen unterschieden in Parametern	93
6.2	Ergebnisse der Kapazitätsauswertung für freie Strecken	94
6.3	Kapazitäten MQ „Beginn Verflechtung“	95
6.4	Kapazitäten MQ „Ende Verflechtung“	96
6.5	Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (17:00 bis 18:00)	98
6.6	Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 17:00 bis 18:00	98
6.7	Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (21:00 bis 22:00)	100
6.8	Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 21:00 bis 22:00	100

1 | Einleitung

Automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge spielen in der heutigen Zeit eine sehr große Rolle. Viele Automobilhersteller und IT - Firmen haben sich das Ziel gesetzt diese Fahrzeuge so schnell wie möglich auf unsere Straßen zu bekommen. Zu diesem Anlass lassen immer mehr Organisationen und Firmen Analysen durchführen. So auch der österreichische Autobahnbetreiber ASFINAG. Sie wollen wissen, wie sich die Leistungsfähigkeit und somit auch die Auslastung des hochrangigen Straßennetzes in Österreich entwickeln wird. Zu diesem Zweck wurde ein Projekt namens VEGAS initiiert, in dem das Institut für Straßenwesen (ISV) der TU Graz in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum Virtual Vehicle Analyseszenarien im mikroskopischen Bereich durchführt und diese Ergebnisse anschließend in das makroskopische Modell, das für diese Arbeit von der ASFINAG zur Verfügung gestellt wurde, ein speist. Dieses Modell bietet die Möglichkeit die Auswirkungen im gesamten hochrangigen Straßennetz von Österreich zu betrachten.

1.1 Problemstellung

Autonome Fahrzeuge bieten neue Chancen der Mobilität. Den Menschen, die bis dato in der Mobilität beschränkt waren und nicht bzw. eingeschränkt am öffentlichen Leben teilhaben konnten, wird durch die Autonomie neue Möglichkeiten gegeben. Aber auch der gesellschaftliche Nutzen muss im Vordergrund stehen. Autonome sowie automatisierte Fahrzeuge sollen unter anderem die Sicherheit und die Effizienz im Straßenverkehr nicht nur im gleichen Maß halten, sondern diese auch verbessern. Aus verkehrlicher Sicht sind die Einflüsse der automatisierten Fahrzeuge auf die Kapazität und den Verkehrsfluss einer Strecke relevant. Neben der Erhöhung der Durchflussraten kann das automatisierte Fahren aber auch einen wesentlichen Beitrag im Hinblick auf Effizienz und Wirtschaftlichkeit, ökologische Nachhaltigkeit, Entlastung und Komfort und die Sicherheit im Straßenverkehr beitragen. Die Effizienz von Verkehrsanlagen wird mit der Kapazität beschrieben. Diese ist wiederum vom maximal möglichen Verkehrsfluss abhängig. Auf Autobahnabschnitten ist für die Kapazität die Instabilität bestimmend, die sich bei hohen Auslastungsgraden einstellt und zu einem Stau führen kann (vgl. [1]). Auf dem hochrangigen Streckennetz ist die Kapazität im Wesentlichen durch den maximal möglichen Verkehrsfluss auf den Streckenabschnitten sowie die maximal möglichen Verflechtungs- und Ein- bzw. Ausfädelungsverkehrsstärken an den planfreien Knotenpunkten bestimmt. Bei einer Nutzung der Verkehrsanlage durch autonom bzw. automatisiert fahrende Fahrzeuge wird sich die Kapazität gegenüber einer Nutzung durch menschliche Fahrer verändern. Der Fahrkomfort geht aber dadurch nicht verloren, da die Antizipation der Aktionen zum Vordermann gesichert wird. Auch die konstante Geschwindigkeit im Pulk führt zu weniger Beschleunigungs - und Verzögerungsphasen, was zu einem

harmonischen Verkehrsfluss führt. Auch die Geschwindigkeit spielt eine wichtige Rolle in der Kapazitätserhöhung. Hohe Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Dichte können von autonomen Fahrzeugen gefahren werden. Wird das Fahrzeug aber von einem Menschen gesteuert, kommt es zu Einbußen in der Kapazitätsgewinnung. Erste Abschätzungen der Wirkung autonomer bzw. automatisierter Fahrzeuge auf die Kapazität als Maß für die Effizienz von Verkehrsanlagen zeigen signifikante Steigerungspotenziale (vgl.[1]). Die ersten entwickelten Modelle für den Verkehrsfluss und die Kapazität unter Berücksichtigung eines Anteils autonomer Fahrzeuge zeigen, dass die Kapazität mit dem Anteil dieser Fahrzeuge überproportional anwächst. Die Verkürzung der Zeitlücken wirkt schon ab dem ersten automatisiert fahrenden Fahrzeug, die Steigerung der Geschwindigkeit bei hohen Dichten hingegen nur für rein autonomen Verkehr möglich ist und erst bei höheren Ausstattungsraten gefahren werden kann. Die Schwierigkeit ist aber, dass man nicht vorhersehen kann mit welchem prozentuellen Anteil die einzelnen Automatisierungsstufen auf den Straßen unterwegs sein werden. Hier müssen verschiedene Szenarien für den Mischverkehr mit mehreren Marktdurchdringungen durchgespielt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Masterarbeit ist eine vertiefte Untersuchung der Auswirkung von hochautomatisierten Fahrzeugen auf eine mögliche Leistungsfähigkeitserhöhung am hochrangigen Streckennetz Österreichs. Aus den mikroskopischen Simulationen werden für diese Arbeit Fahrzeugdaten bereitgestellt, die auf bestimmten Querschnitten der einzelnen Strecken ermittelt wurden. Diese Daten beinhalten die lokale Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke der einzelnen Querschnitte. Aufbauend auf diesen Werten werden mithilfe der Statistiksoftware R - Project Kapazitäten per Regression berechnet. Die Datenpunkte, die pro Querschnitt ermittelt wurden, können durch eine Funktion beschrieben werden. Das Ziel ist es diese Funktion im $q - v$ - Fundamentaldiagramm zu ermitteln, beschreiben und damit die Kapazität zu bestimmen. Hierbei werden drei verschiedene Varianten vorgestellt und miteinander verglichen. Einzelne Querschnittsdaten werden gemittelt um einen einzigen Wert für diese Straßenabschnitte zu bekommen. Wichtig für makroskopische Verkehrsmodelle sind die Widerstandsfunktionen und auch diese können mithilfe der Daten aus der Mikrosimulation ermittelt werden. Diese Funktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen Auslastungsgrad und aktueller Reisezeit. Hierbei werden drei wichtige Funktionen verwendet und die Vor- bzw. Nachteile aufgezeigt. Nachfolgend werden die Kapazitäten und Widerstandsfunktionen im makroskopischen Netz eingefügt und ausgewertet. Um das hochautomatisierte Fahren mit menschlichen Fahrern zu vergleichen, werden Kenngrößen aus dem Netz gelesen. Diese Größen beschreiben das gesamte Netz und darunter fallen Werte wie „Summe Fahrzeugkilometer“ oder „Reisezeit im Netz“. Im Folgenden sind die Ziele nochmals aufgeführt:

- Ermittlung von Kapazitäten aus den Querschnittsdaten der mikroskopischen Simulation
- Parameterschätzung durch Regressionsanalyse von bekannten CR - Funktionen
- Makroskopische Leistungsfähigkeitsbetrachtung und Kenngrößenvergleich von SAE 0 und 4
- Analyse und Auswertung dieser Erkenntnisse

2 | Theoretische Grundlagen

Die Automatisierung des Verkehrs ist ein vielschichtiges und komplexes Thema. Es gibt zahlreiche Aspekte, die man berücksichtigen muss. In diesem Kapitel wird der Begriff der Autonomie bzw. Automatisierung näher gebracht. Da es hauptsächlich um die Bestimmung des verkehrstechnischen Einflusses von automatisierten Fahrzeugen geht, wird hier sehr detailliert auf die Kapazität eingegangen. Auch Kapazitätsbeschränkungsfunktionen werden in diesem Kapitel genau erklärt und es wird einen kleinen Einblick in die makroskopische Verkehrsmodellierung geben.

2.1 Stufen der Automatisierung

In dieser Arbeit geht es darum, die Auswirkung automatisierter Fahrzeuge (engl.: automated vehicles (kurz:AVs)) auf das hochrangige Streckennetz Österreichs zu untersuchen. Die Automatisierung optimiert das Zusammenspiel zwischen Lenker und Fahrzeug. Auch haben diese Fahrzeuge Möglichkeiten den Verkehrsfluss, die Stabilität und die Sicherheit im Verkehr stark zu beeinflussen.

Die Fahrzeuge können in verschiedene Automatisierungsstufen eingeteilt werden. SAE International ist eine Organisation, der Ingenieure verschiedener Transportbranchen angehören. Diese arbeiteten ein System aus, das im Jahr 2014 Geltung erlangt hat und sechs Stufen der Automatisierung kennt. Diese sollen aber nicht die Fahrzeugklassen definieren, sondern die Mindestanforderungen für Betriebsarten beschreiben. In der folgenden Abbildung 2.1 kann man diese Einteilung sehen.

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system ("system") monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

Copyright © 2014 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed provided SAE International and J3016 are acknowledged as the source and must be reproduced AS-IS.

Abbildung 2.1: SAE - Levels (vgl. [2])

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Level 0 und 4. Das heißt es soll in dieser Arbeit die makroskopische verkehrliche Wirkung des hochautomatisierten Fahrens im Vergleich mit dem Level 0 (keine Automatisierung) aufgezeigt werden. Trotzdem werden im Folgenden die einzelnen Stufen kurz erklärt.

Die Einteilung nach SAE - Stufen ist die jüngste vorhandene und wird auch in Fachkreisen sehr oft benutzt. Von Level 0 oder „keine Automatisierung“ kann auch noch gesprochen werden, wenn der Fahrer von Systemen wie ABS oder ESP unterstützt wird. Falls aber ein Assistenzsystem entweder die Lenkung oder die Be- bzw. Entschleunigung übernimmt, spricht man schon von Level 1. Übernimmt das System beides, geht man von Level 2 aus. Für die ununterbrochene Kontrolle ist aber immer ein Lenker notwendig. Ab Level 3 wird der Mensch in bestimmten Betriebsarten auf eine Beobachterrolle reduziert und greift nur dann ein, falls der Computer ihn dazu auffordert. Level 4 kennt auch Betriebsmodi, in denen der Lenker zur Reaktion aufgefordert wird. Handelt dieser jedoch nicht, wird das Fahrzeug trotzdem autonom weiter gesteuert. Bei Level 5 ist das Fahrzeug nicht mehr auf bestimmte Betriebsarten beschränkt. Der Mensch ist dennoch in der Lage, dass er handelt, falls er möchte. Das Fahrzeug kann sich in allen Verkehrssituationen ohne Eingreifen des Lenkers autonom weiter bewegen. Neben den verschiedenen Automatisierungsstufen hat das „Platooning“ eine noch größere Auswirkung auf den Verkehr. Unter Platooning versteht man eine Gruppierung von Fahrzeugen, die in sehr geringem Abstand fahren kann. Diese Methode soll die Kapazität von hochrangigen Strecken erhöhen. Durch den Wegfall der Reaktionszeit, die der Mensch benötigt, kann dieser neue Abstand gefahren werden. Für das Fahren in einem Platoon wird es notwendig sein, sich ein neues Fahrzeug zu kaufen oder, falls es möglich ist, nachzurüsten. Eine der neuesten Testreihen in Amerika bei California PATH haben gezeigt, dass Fahrzeuge in Platoons mit einem Abstand von 0,6 Sekunden fahren können (vgl. [3]). Hierbei sind aber spezielle Systeme notwendig wie zum Beispiel CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control), welches erlaubt, dass die Fahrzeuge miteinander kommunizieren können. Für nicht automatisierte Fahrzeuge gelten die 1,4 Sekunden (vgl. [3]).

2.2 Wirkung des automatisierten Fahrens

Für die mathematische Abbildung des Verkehrsablaufs wird von vereinfachenden Annahmen ausgegangen. Das Wegenetz wird zum Beispiel in freie Strecken und Knotenpunkte aufgeteilt. Die makroskopische Abbildungsweise betrachtet eine Menge von Fahrzeugen und die relevanten Kennwerte eines Verkehrsstroms:

- Verkehrsstärke q [Fzg/h]
- Verkehrsdichte k [Fzg/km]
- mittlere Geschwindigkeit v [km/h]

Der Verkehrsablauf lässt sich durch Messungen dieser Kennwerte an einem bestimmten Querschnitt über einen Zeitraum oder durch Messungen an einem bestimmten Zeitpunkt über ein Wegintervall erfassen.

Doch diese Werte allein definieren noch nicht den Verkehrszustand. Hierfür ist die Kenntnis der gegenseitigen Abhängigkeit wichtig. Diese ist durch folgende Formel definiert:

$$q = v \cdot k \quad (2.1)$$

Das Fundamentaldiagramm ist die grafische Abbildung dieser Zustandsgleichung und somit des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Kenngrößen. Es gibt drei verschiedene Fundamentaldiagramme, die im Folgenden aufgezählt sind:

- Verkehrsdichte - Geschwindigkeit ($k - v$) - Diagramm
- Verkehrsstärke - Geschwindigkeit ($q - v$) - Diagramm
- Verkehrsstärke - Verkehrsdichte ($q - k$) - Diagramm

In der folgenden Abbildung 2.2 kann man eine Darstellungsform dieser drei Diagramme nach Schick sehen (vgl.[4]).

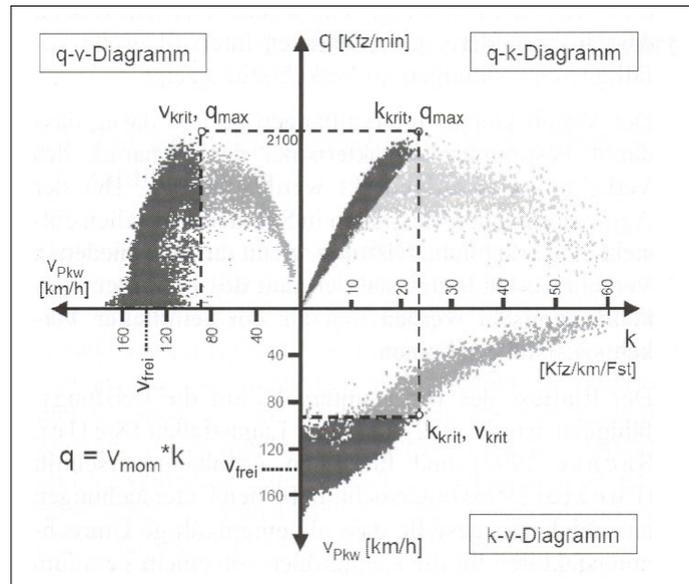


Abbildung 2.2: Darstellungsformen des Fundamentaldiagramms nach Schick (vgl.[4])

Anhand dieser einzelnen Diagramme können vielfache Aussagen über den Verkehrsfluss an einem Straßenquerschnitt und seine Charakteristik getroffen werden. Weiters ist es möglich die Änderung des Verkehrsflusses anhand von Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Zuflussregelungen zu beobachten. Die größte Bedeutung kommt dem $q - v$ - Diagramm zu, da dieses zur Dimensionierung von Straßenquerschnitten verwendet wird. Dieses weist eine parabelförmige Form der Punktwolke auf und der Scheitelpunkt wird durch die Verkehrsstärke q_{max} und der optimalen Geschwindigkeit v_{opt} definiert (=Kapazität eines Straßenbahnabschnittes). Der dunkle Bereich der Datenpunkte ist der sogenannte stabile Zustand und der helle Bereich der instabile. Mit der Fundamentalbeziehung aus der Formel 2.1 ergibt sich dann das $q - k$ - Diagramm. Das $k - v$ - Diagramm stellt schließlich die Geschwindigkeit über der Verkehrsstärke dar. Mit steigender Geschwindigkeit fällt die Verkehrsdichte annähernd kontinuierlich ab und deshalb kann hier die Grenze zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss nur sehr schwer gezogen werden. Neben diesen beiden Bereichen kann das Fundamentaldiagramm in weitere Zustandsformen aufgeteilt werden, die in Abbildung 2.3 abgebildet sind.

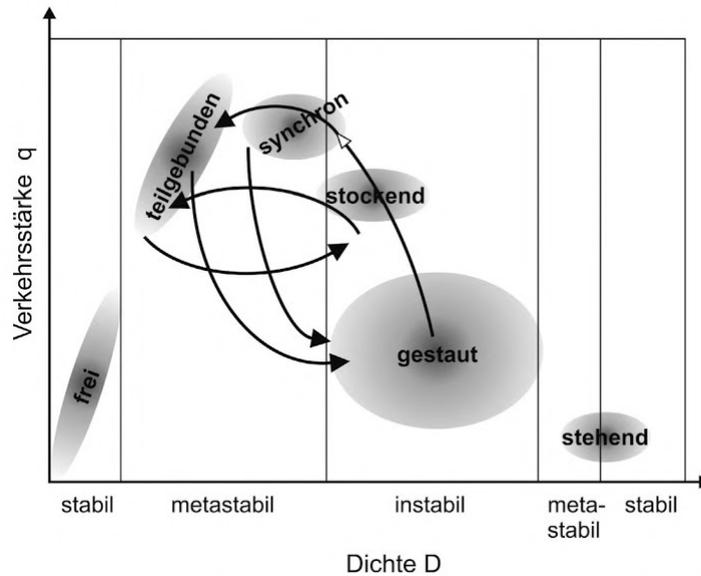


Abbildung 2.3: Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm lässt erkennen, dass bei gleicher Verkehrsstärke q zwei unterschiedliche Qualitäten des Verkehrs auftreten können. Die Kapazität (q_{max}) trennt den Bereich hoher Geschwindigkeiten bei geringer Verkehrsdichte vom Bereich mit geringen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten. Die Effizienz des Verkehrssystems ist abhängig von der Kapazität einer Verkehrsanlage. Die Dichte in einem homogenen Verkehrsfluss ergibt sich aus dem Reziprok des Platzbedarf eines Fahrzeugs (vgl. [1]):

$$k = \frac{1}{v \cdot T_h + L} \quad (2.2)$$

T_h ist hier der zeitliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (Zeitlücke) und L die Länge eines Fahrzeugs. Mithilfe der Formel 2.1 und der Annahme, dass das Fahrzeug von einem Menschen gesteuert wird, ergibt sich im Folgenden die Kapazität mit:

$$q_{max} = \frac{v}{v \cdot T_h + L} \quad (2.3)$$

Im Falle, dass rein autonome Fahrzeuge unterwegs sind, wird T_h durch T_a ersetzt und enthält somit die Zeitlücke, die von autonomen Fahrzeugen gefahren werden kann. Empirische Messungen haben ergeben, dass eine realistische Größe für T_h 1,15 s ist (vgl. [1]). Für die Veränderung der Kapazität bei automatisierten Fahrzeugen ist natürlich die Zeitlücke entscheidend und hierbei kann von einem Wert von $T_a = 0,5$ s ausgegangen werden. Dieser Wert ist technisch realisierbar und aus Sicht der Verkehrsteilnehmer akzeptabel (vgl. [1]). Der Abstand von 0,5 s tritt bereits heute je nach Verkehrsverhältnissen bei über 20 % aller Folgeabstände auf (vgl. [1]). Der Kapazitätswachstum ist in der folgenden Abbildung 2.4 zu sehen.

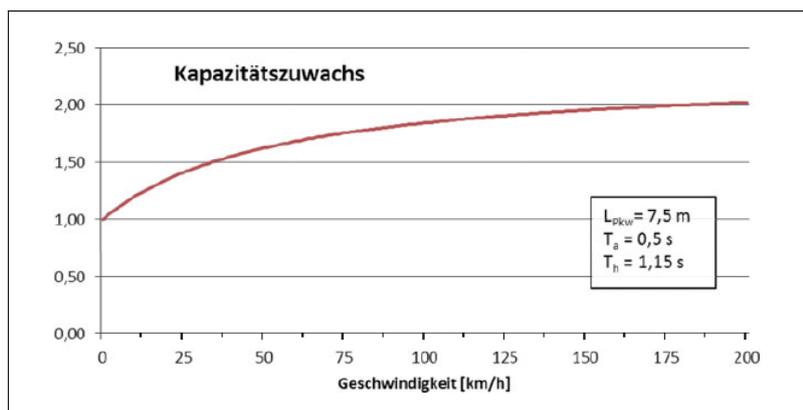


Abbildung 2.4: Kapazitätzuwachs bei ausschließlich autonom fahrenden Fahrzeugen (vgl.[1])

Ein großes Problem ist, wie sich die Kapazität mit zunehmender Automatisierung verändert. Der sogenannte Mischverkehr, in dem sich mehrere Stufen der Automatisierung treffen, ist von der Erhöhung des Verkehrsflusses nur marginal betroffen. Man geht davon aus, dass man erst ab einer Penetrationsrate von über 50% mit einer größeren Erhöhung der Kapazität rechnen kann (vgl. [5]). Für die Auswertung in dieser Arbeit wird man sich aber nur mit zwei Automatisierungsstufen beschäftigen (0 und 4) und diese jeweils mit einer Penetrationsrate von 100%.

Man geht davon aus, dass AVs in Zukunft den Verkehrsfluss und somit die Kapazität von Straßen erhöhen. Auch die Funktion von Verkehrsaufkommen und Verspätungen werden sich grundlegend ändern. Stauerscheinungen sind ein Problem, mit dem man sich schon länger auseinandersetzt. In den meisten Fällen handelt es sich um menschliches Fehlverhalten. Auch Faktoren wie Unfälle und Auslastung des Streckennetzes spielen eine wichtige Rolle. Durch die Einführung von AVs kann eine höhere Konstanz in Bereich der Reisezeit erreicht werden. Tientrakool et al. (vgl. [6]) haben Analysen durchgeführt um die Frage zu beantworten, wie sich Sensoren auf die Kapazität auswirken werden. Zum Beispiel bei einem Abstandsregeltempomat, der automatisch die Geschwindigkeit an den vor ihm fahrenden Fahrzeugs anpasst, sind Kapazitätserhöhungen von rund 33 % möglich. Im Falle, dass alle Fahrzeuge mit Sensoren (ACC) ausgestattet sind, kann eine Erhöhung der Kapazität von 43 % erreicht werden (vgl. [6]). Diese Zahlen variieren je nach Art und Gebrauch der einzelnen Sensoren. Falls man einen Schritt weitergeht und schon eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen besteht, steigt die Kapazität um bis zu 273 % (vgl. [6]). Für die Ergebnisse in diesem Paper unterscheidet man zwischen Fahrzeugen ohne Sensor, mit Sensor und abschließend noch Fahrzeuge, die nicht nur Sensoren verbaut haben, sondern auch miteinander kommunizieren können. Der Prozentsatz variiert, da man nicht davon ausgehen kann, dass immer 100% aller Fahrzeuge die gleiche Ausstattung haben. Hier werden alle möglichen Szenarien durchgespielt und schließlich je ein Durchschnittswert über alle Abstandsberechnungen der drei großen Sensor - Gruppierungen gezogen (vgl.[6]). Die Ergebnisse können in den Abbildungen 2.5

und 2.6 betrachtet werden:

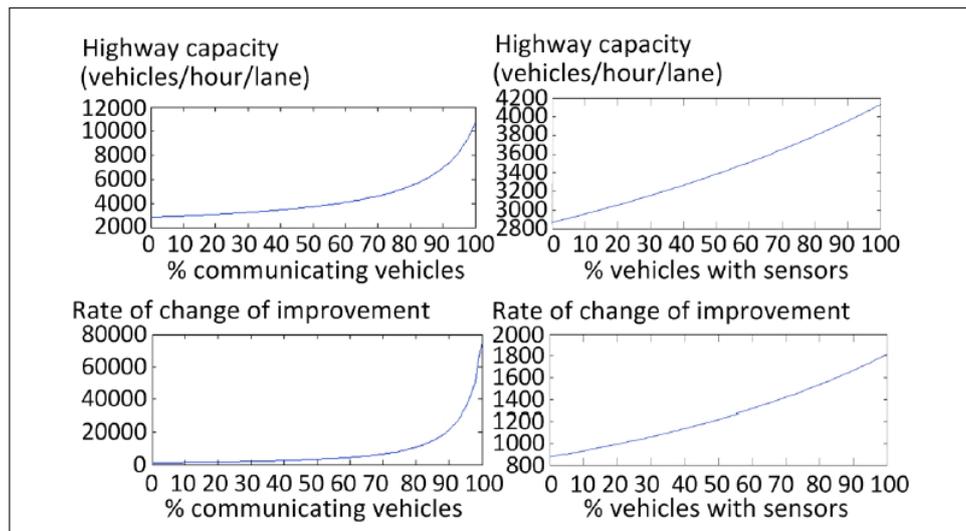


Abbildung 2.5: Änderung der Kapazität mit variierender Prozentzahl bei 100 km/h (vgl. [6])

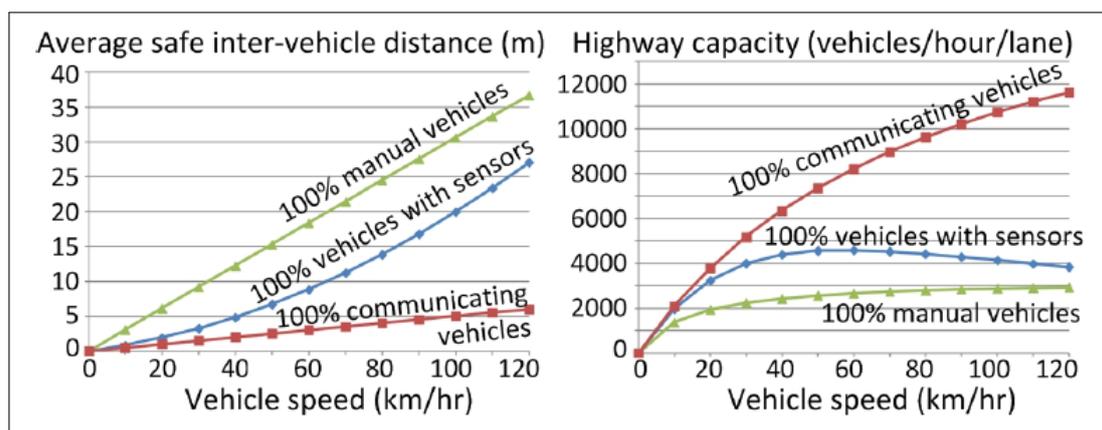


Abbildung 2.6: Abstands- bzw. Kapazitätsänderungen bei unterschiedlicher Geschwindigkeit (vgl. [6])

Abbildung 2.5 zeigt die Auswirkung von kommunizierenden Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Sensoren auf die Kapazität. Man sieht, dass es einen fast linearen Anstieg der Kapazität bei Zunahme von Fahrzeugen mit Sensoren gibt, wohingegen mit laufender Kommunikation ein exponentieller Zuwachs der Kapazität ab einem 80%-igen Anteil im Straßenverkehr sich abbildet. Abbildung 2.6 zeigt einerseits die Änderung der durchschnittlichen Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen und andererseits wieder die Änderung der Kapazität infolge zunehmender Geschwindigkeit. Interessanterweise gibt es einen Einbruch in der Kapazität, wenn sich die Geschwindigkeit bei Fahrzeugen mit Sensoren erhöht. Die Kommunikation ermöglicht es in beiden Fällen positive Aspekte zu verbuchen. Der einzige Nachteil ist, dass die positive Wirkung von kommunizierenden Fahrzeugen erst ab einer Penetrationsrate von 80% zu sehen ist.

Maurer et al. (vgl. [1]) haben auch die Kapazitätsänderung bei gemischtem Verkehr berücksichtigt. Hier

werden die Zeitlücken entsprechend geändert. Als realistische Werte wurden Zeitlücken von $T_{ah} = 0,9 \text{ s}$ angenommen. In der Abbildung 2.7 kann man die Änderung der Kapazität bei gemischtem Verkehr betrachten. Hierbei handelt es sich um reinen PKW - Verkehr. Dies kann aber auch ganz leicht für den LKW - Verkehr angewendet werden, in dem man die Länge des Fahrzeugs verändert. Zur Berechnung der Kapazität werden wieder die beiden Formeln 2.2 und 2.3 verwendet.

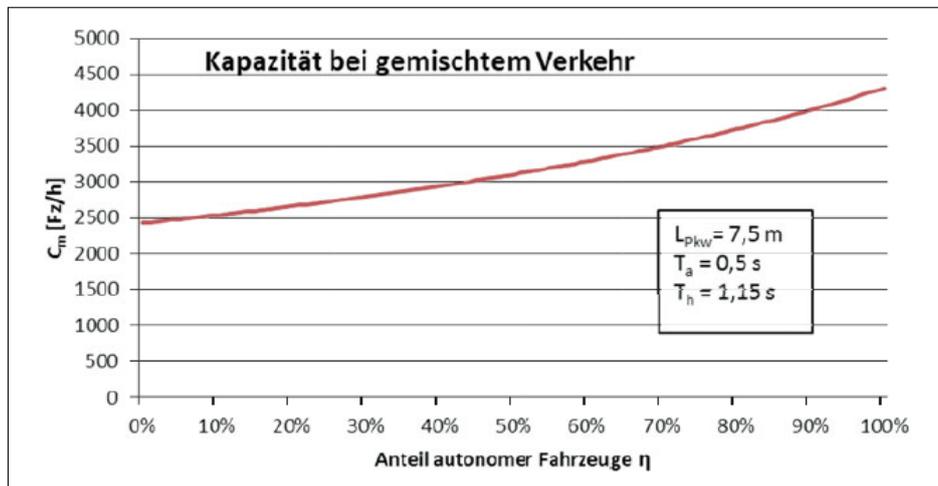


Abbildung 2.7: Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit der Penetrationsrate (vgl.[1])

In Deutschland haben sich u.A. die technische Universität München und das Karlsruher Institut für Technologie die Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur beschäftigt (vgl. [7]). Hier wurden, wie auch in dieser Arbeit, Simulationen in einem makroskopischen Netz durchgeführt. Sie haben aber auch des weiteren die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte (Mischverkehr) und die wirtschaftlichen Auswirkungen beleuchtet. Das Thema Zeitlücken, das auch schon in Maurer et al. besprochen wurde, wird hier ein wenig detaillierter beschrieben. Der Resultat bleibt gleich und besagt, dass man den Mischverkehr betrachten sollte, da man nicht von einem 100 %-igen Ausstattungsrad für automatisierte Fahrzeuge ausgehen kann. Abbildung 2.8 zeigt das Abstandsverhalten für den Mischverkehr von Fahrzeugen mit unterschiedlicher Automatisierung.

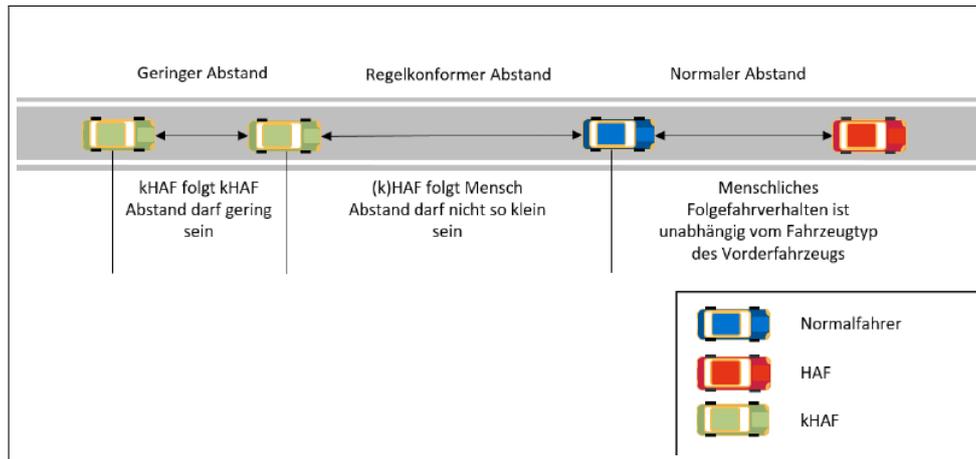


Abbildung 2.8: Abstandsverhalten im Mischverkehr (vgl.[7])

Wie man an der Abbildung sehen kann, darf ein kommunizierendes hochautomatisiertes Fahrzeug (kHAF) einem anderen kHAF in einem möglichst geringem Abstand folgen. Diese Zeitlücke darf 0,9 Sekunden unterschreiten. Die hochautomatisierten Fahrzeuge (HAF) dürfen, wie auch die von Menschen gesteuerte Fahrzeuge, nur eine Mindestzeitlücke von 1,8 Sekunden einhalten. Der §18 Abs 1 StVO beinhaltet das Abstandhalten und besagt: „Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird.“(vgl. [9]).

In diesem Bericht werden aber nicht nur die Kapazitätsänderungen hinsichtlich der freien Strecken (2 - streifig, 3 - streifig,...) simuliert, sondern auch die der Anschlussstellen (Knotenpunkte). Abbildungen 2.9 und 2.10 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Änderung für eine Einfahrt und für die freien Strecken. Man sieht Einbußen in der Kapazität bei den hoch- und teil-automatisierten Fahrzeugen und diese werden höher je größer die Penetrationsrate ist. Einzig und allein die kHAF können immer eine Kapazitätserhöhung erreichen. Diese Ergebnisse beziehen sich aber nicht nur auf Einfahrten und Ausfahrten sondern auch auf freie Strecken. Hier sind noch höhere Verluste in der Kapazität zu verzeichnen, wenn die Fahrzeuge nicht untereinander kommunizieren.

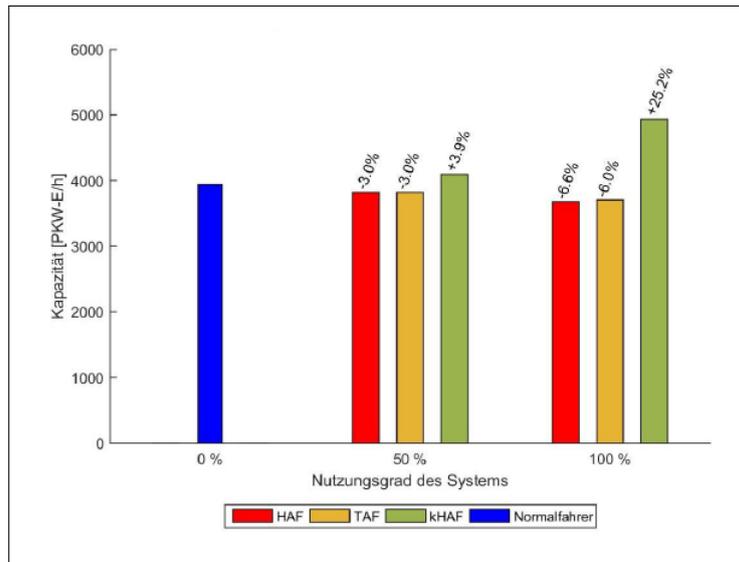


Abbildung 2.9: Kapazitätsänderung von einer Einfahrt (vgl.[7])

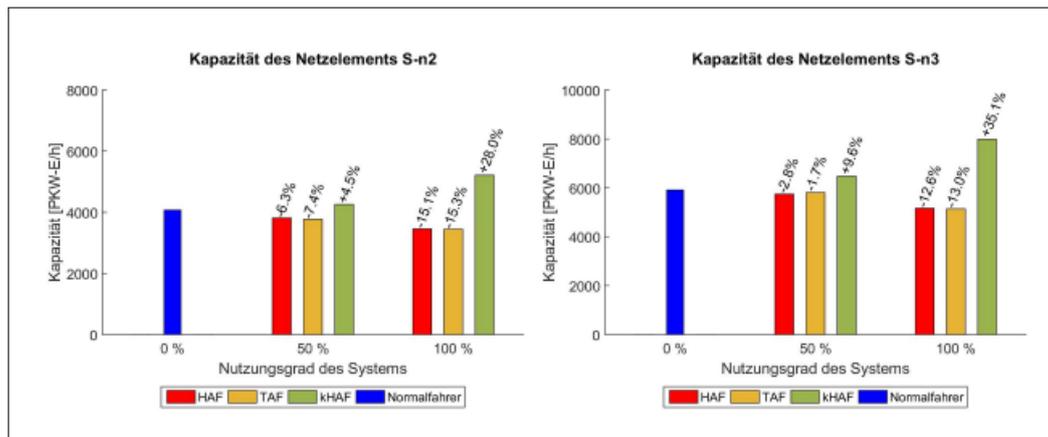


Abbildung 2.10: Kapazitätsänderung auf den freien Strecken (vgl.[7])

Diese Ergebnisse werden in das makroskopische Modell eingespeist, um einen Überblick zu bekommen, wie sich diese Werte auf das gesamte Straßennetz auswirken. In der folgenden Abbildung 2.11 sieht man den Unterschied auf dem deutschen hochrangigen Straßennetz zwischen Fahrzeugen, die von Menschen gesteuert werden und kHAF.

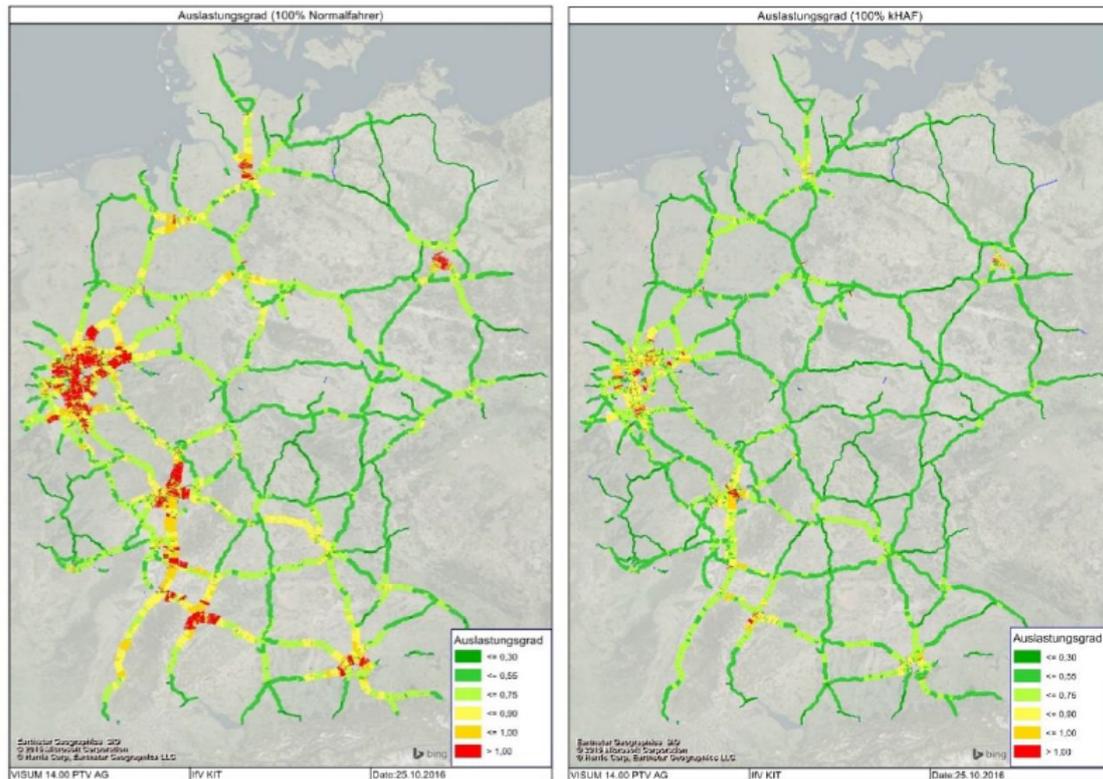


Abbildung 2.11: Änderung des Auslastungsgrades zufolge kHAF (vgl.[7])

In dieser Abbildung kann man die Änderung des Auslastungsgrades sehen, links 100% Normalfahrer und rechts 100% kHAF. Je höher die Kapazität der Straße, desto geringer wird der Auslastungsgrad. Deshalb merkt man auch an der Abbildung, dass sich die kommunizierenden Fahrzeuge positiv auf das Streckennetz auswirken. Vor allem in den Ballungsräumen sieht man einen sehr großen Vorteil, da sich hier auch viele Anschlussstellen befinden. Im ruralen Gebiet sieht man auch eine gewisse Verbesserung, die aber nicht sehr groß ausfällt. Dieses Thema wird auch in dieser Arbeit ein wenig später näher beleuchtet und erklärt (siehe Kapitel 4.8).

In Texas gab es eine makroskopische Untersuchung der Wirkung von autonomen Fahrzeugen auf Autobahnabschnitten bzw. Hauptstraßen (vgl. [8]). In dieser Literatur sind natürlich größere Sprünge in der Kapazität zu beobachten, weil auch hier wieder die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen eine wesentliche Rolle spielt. Man ist hierbei von einer Reaktionszeit von 0,5 s ausgegangen. Die drei Straßen, die untersucht wurden, sind die Interstate 35, die US - 290 und MOPAC (siehe Abbildung 2.12).



Abbildung 2.12: Untersuchte Strecken in Texas (vgl.[8])

Die I - 35, die in der Abbildung ganz links zu sehen ist, ist eine der verkehrsreichsten Straßen in Texas (über 128 000 Fahrzeuge innerhalb von 4 Stunden). Auf der US - 290 verkehren über 11 000 Fahrzeuge innerhalb von 4 Stunden und schlussendlich die MOPAC - Schnellstraße mit über 27 000 Fahrzeugen. Diese drei Straßen befinden sich in der Region um Austin und gehören zu den 100 Straßen in Texas, die am verkehrsreichsten sind. Im Unterschied zu vorliegender Arbeit ist, beschäftigt sich die Untersuchung von Rahul et al. (vgl. [8]) nur auf Kreuzungen bzw. Knotenpunkte konzentrieren. Hierbei ist untersucht worden, ob die neue Technologie, die autonome Fahrzeuge mitbringen würde, sich positiv auswirken wird. Diese neue Technologie basiert auf eine „reservierungsbasierte“ Steuerung der Kreuzungen und würde die Lichtsignalsteuerungen im herkömmlichen Sinne abschaffen. Da die Fahrzeuge miteinander kommunizieren können, reserviert sich jedes dieser Fahrzeuge einen Platz. Somit würde es ein gewisses Reißverschlussystem geben. Ob es dann wirklich zu einer Abschaffung einer VLSA kommen wird, bleibt abzuwarten. Zum Vergleich wird einerseits die gesamte Reisezeit im System und andererseits die mittlere Reisezeit pro Fahrzeug herangezogen. In der nächsten Tabelle (siehe Abbildung 2.13) kann man die Ergebnisse auf der I35 betrachten.

I-35					
Intersections	Demand	Proportion of AVs	TSTT (hr)	Travel time per vehicle (min)	
Traditional	50%	0%	3998.9	3.75	
Traditional	50%	100%	3893.3	3.65	
Reservations	50%	100%	3975.2	3.73	
Traditional	75%	0%	10087	6.3	
Traditional	75%	100%	5934.2	3.71	
Reservations	75%	100%	9861.1	6.16	
Traditional	85%	0%	16127.7	8.89	
Traditional	85%	25%	16023.5	8.83	
Traditional	85%	50%	15944.3	8.79	
Traditional	85%	75%	14545.3	8.02	
Traditional	85%	100%	14101.6	7.77	
Reservations	85%	100%	16084.7	8.87	
Traditional	100%	0%	31611.7	14.81	
Traditional	100%	100%	9063.3	4.25	
Reservations	100%	100%	30211.3	14.16	

Abbildung 2.13: Ergebnisse der I35 (vgl.[8])

Wie man sehen kann, kommt es bei der neuen Steuerung (Reservations) zu Einbußen der Reisezeit, da auf der I35 die Zufahrtsdosierung nicht mit VLSA kontrolliert wird. Deshalb gibt es hier auch keine Verbesserung durch Reservationen. Die größte Auswirkung dieser Steuerung ist bei Rechtsabbiegern auf die Autobahn zu sehen. Eine mögliche Erklärung ist, dass hier das Rechtsabbiegen weniger Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern zur Folge hat als bei Geradeausfahrten und Linksabbiegern. Die Reduktion der Reaktionszeit führt wie schon erwähnt, zu höheren Kapazitäten und somit zu besseren Reisezeiten in allen Szenarien. Auf der US - 290 hingegen wird der Zufluss durch Signalanlagen gesteuert und somit zeigt sich auch bei der neuen „reservierungsbasierten“ Steuerung Vorteil (siehe Abbildung 2.14)

US-290					
Intersections	Demand	Proportion of AVs	TSTT (hr)	Travel time per vehicle (min)	
Traditional	50%	0%	557.8	6.03	
Traditional	50%	100%	547.5	5.92	
Reservations	50%	100%	505.4	5.47	
Traditional	75%	0%	845.7	6.1	
Traditional	75%	100%	827.7	5.97	
Reservations	75%	100%	759.8	5.48	
Traditional	85%	0%	997.6	6.35	
Traditional	85%	25%	952	6.06	
Traditional	85%	50%	945.3	6.01	
Traditional	85%	75%	942.5	6	
Traditional	85%	100%	939.8	5.98	
Reservations	85%	100%	860.6	5.47	
Traditional	100%	0%	1518.5	8.21	
Traditional	100%	100%	1108.8	5.99	
Reservations	100%	100%	1014.1	5.48	

Abbildung 2.14: Ergebnisse der US - 290 (vgl.[8])

Der Einfluss von AVs und von autonomen Fahrzeugen kann derzeit nur abgeschätzt werden, da dieser von Faktoren wie Marktdurchdringung und technologische Weiterentwicklung abhängig ist und AVs noch nicht in realer Umgebung verkehren. Aber trotzdem sollten die Auswirkungen so früh wie möglich untersucht werden, damit Straßenbetreiber rechtzeitig auf diesen Trend reagieren können.

2.3 Kapazitätsbeschränkungsfunktionen

In makroskopischen Modellen wird der Einfluss der aktuellen Verkehrsstärke auf die Reisezeit mit einer Widerstandsfunktion abgebildet. Diese ist von der Kapazität der jeweiligen Strecken abhängig. Neben der Kapazität und der Verkehrsstärke gibt es noch weitere Einflussgrößen wie die Streckenreisezeit im unbelasteten Netz t_0 sowie Funktionsparameter. Im Normalfall werden für diese Widerstandsfunktionen (Capacity - Restraint - Functions, kurz CR - Kurven) nur Default - Werte für die Parameter im Verkehrsmodell verwendet. In dieser Arbeit werden aber die Parameter nach Streckentyp geschätzt. Die Kapazitätsbestimmung und die Schätzung der Parameter erfolgen über Daten aus dem mikroskopischen Modell. In diesem Kapitel werden drei wichtige CR - Funktionen vorgestellt und besprochen (BPR, Conical - Spiess und Akçelik), die in der Verkehrsplanung und Verkehrstechnik am häufigsten eingesetzt werden.

BPR - Funktion

Die in den USA von dem Bureau of Public Roads (BPR) erstellte Formel einer CR - Funktion ist parabolisch und wird wie folgt geschrieben:

$$t = t_0 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{\gamma \cdot C} \right)^\beta \right] \quad (2.4)$$

Mit

t	aktuelle Streckenreisezeit
t_0	Reisezeit im unbelasteten Netz (Nullreisezeit)
q	streckenbezogene Verkehrsstärke je Zeiteinheit
C	Kapazität der Strecke je Zeiteinheit
α, β, γ	Funktionsparameter

Die zwei Parameter α und β werden seit der Einführung der BPR - Funktion im Jahr 1964 für verschiedene Anwendungen empirisch geschätzt (vgl. [10]). Der γ - Wert ist ein speziell in Verkehrsmodellen vorkommender Parameter. Auf diesen Wert wird erst später in dieser Arbeit eingegangen (siehe Kapitel 4.7). Wie man in der Abbildung 2.15 sehen kann, steigt die BPR - Kurve nach der Erreichung der Kapazität stark an. Das heißt, dass die Reisezeit nach dem Erreichen der Kapazität sehr stark zunimmt. Die Einfachheit der Formel ist einer der Gründe, warum die BPR - Funktion in der Anwendung von Verkehrsmodellen weit verbreitet ist.

Conical - Spiess - Funktion

Heinz Spiess veröffentlichte 1990 eine konische Funktion, mit dem Ziel, bekannte Nachteile der BPR - Funktion zu umgehen (vgl. [11]). Einer dieser Nachteile ist, dass hohe Rechenleistungen notwendig sind, da man zwei transzedente Funktionen rechnen muss (logarithmische und exponentielle Funktion) (vgl. [11]). Die Spiess - Funktion ist eine hyperbolische Kurve und ist mit folgender Formel zu erklären.

$$t = t_0 \cdot \left[2 + \sqrt{\alpha^2 \cdot (1 - x)^2 + \beta^2} - \alpha \cdot (1 - x) - \beta \right] \quad (2.5)$$

Wobei

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2} \quad (2.6)$$

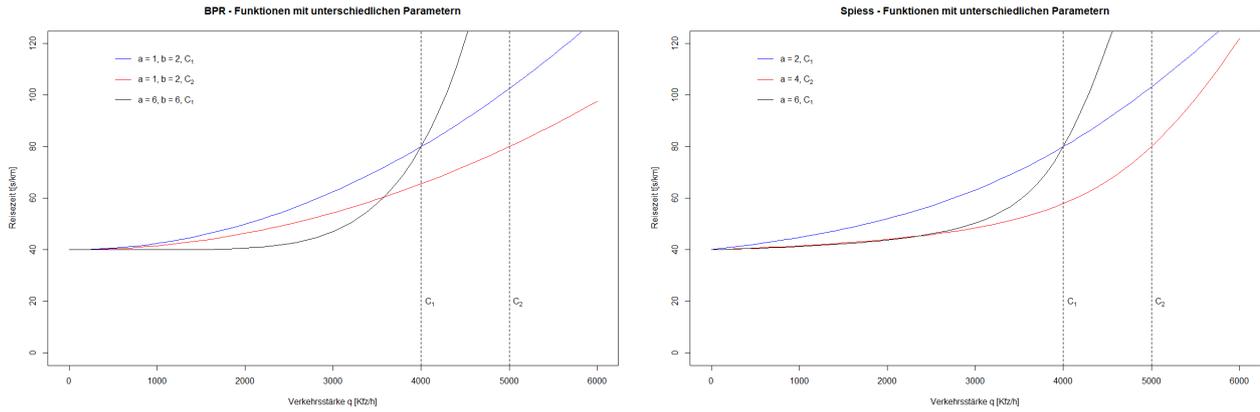
Mit

x Auslastung der Strecke, Quotient aus Verkehrsstärke q und Kapazität C

α, β Funktionsparameter

Der Vorteil der Spiess - Funktion ist, dass β durch α ausgedrückt werden kann. Somit braucht man nur noch einen Funktionsparameter abschätzen.

In der folgenden Abbildung 2.15 kann man die beiden Funktionen sehen. Hierbei sieht man die Auswirkung der Parameteränderungen auf die Funktion.



(a) BPR - Funktionen mit verschiedenen β - Parametern (b) Spiess - Funktionen mit verschiedenen α - Werten

Abbildung 2.15: Funktionsunterschied zwischen BPR und Conical - Spiess

Wie man an beiden Abbildungen sehen kann, schneiden sich die CR - Funktionen mit gleicher Kapazität C_1 auch an der gleichen Stelle. Ist die Kapazität höher (C_2), dann kann man auch die Steigungsänderung der Funktionen nach der Erreichung der Kapazität durch die Änderung der Formparameter betrachten. Je höher der α - Wert bei Spiess oder der β - Wert bei BPR ist, desto steiler ist die Kurve nach der 100 %-igen Auslastung (q größer als Kapazität).

Akçelik - Funktion

Im Jahr 2000 veröffentlichte Rahmi Akçelik eine modifizierte und zeitabhängige Widerstandsfunktion. Diese Funktion sollte Probleme bei der Kalibrierung der originalen Davidson - Funktion vermeiden. Weiters ist es möglich, dass diese Kurve auch im innerstädtischen Bereich angewendet wird, da sie auch für die Berechnung von Knotenwiderständen herangezogen werden kann (vgl. [12]). Die Akçelik - Funktion hat folgende Form:

$$t = t_0 + \left\{ 0,25 \cdot T \cdot \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \left(\frac{8 \cdot J_A \cdot x}{C \cdot T} \right)} \right] \right\} \quad (2.7)$$

Mit

T Zeitintervall in Stunden, auf die sich die Verkehrsstärke q bezieht

J_A Zeitverlust - Parameter

Wie schon oben erwähnt, ist diese CR - Funktion zeitabhängig. Je nach Aggregationsintervall der Eingangsdaten (1 min, 5 min, 50 min), ändert sich die Form der Kurve. Auch zu erwähnen ist, dass wiederum nur ein Funktionsparameter zu schätzen ist (J_A).

2.4 Verkehrsumlegung in makroskopischen Verkehrsmodellen

In der Verkehrsplanung wird zur Modellierung des Verkehrs der sogenannte 4 - Stufen Algorithmus verwendet. Die vier Stufen sind Verkehrs- erzeugung, -verteilung, -aufteilung und -umlegung. In dieser Arbeit ist nur der letzte Schritt (Verkehrsumlegung) besonders wichtig, da die übrigen Phasen nicht Teil dieser Arbeit und schon abgeschlossen sind. Dennoch soll hier ein kurzer Überblick geschaffen werden, wie die vier Stufen abgearbeitet werden.

Nach den ersten beiden Schritten, Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung, erhält man eine fertige Nachfragematrix. Diese Matrix beinhaltet die Anzahl der Fahrten von Bezirk i nach Bezirk j . Je nach Größe des Untersuchungsgebietes kann auch die Größe der Matrix variieren. In dieser Arbeit wird das hochrangige Straßennetz von Österreich betrachtet und weist eine Matrix der Größe von 2584×2584 auf. Diese liegt in diesem Modell mit Tageswerten vor. Es gibt insgesamt zwei Matrizen (PKW gesamt und LKW). Für die spätere Umlegung werden beide Matrizen verwendet. Der Schritt der Verkehrsmittelwahl ist mit diesen Matrizen auch schon abgearbeitet und man kommt letztendlich auf den letzten Schritt der Verkehrsmodellierung und somit zum wichtigsten in dieser Arbeit, die Verkehrsumlegung. Hier werden die Matrizen auf das Streckennetz Österreichs umgelegt und übernimmt die Aufgabe der Routenwahl. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Verkehrsumlegung in der Modellierung. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Verfahren genauer beschrieben und die Unterschiede erklärt.

2.4.1 Sukzessivumlegung

Die Sukzessivumlegung ist die vom Prinzip, verglichen mit den danach vorgestellten Verfahren, die einfachste Methode. Sie simuliert die schrittweise Füllung eines Verkehrsnetzes mit Fahrzeugen. Zu Beginn gibt es ein unbelastetes Straßennetz, in dem für jede Quell - Ziel - Beziehung eine kürzeste Route existiert. Das Netz wird dann schrittweise belastet und es ändern sich hierbei die Widerstände auf den Strecken, Abbiegern und Anbindungen. Nach jedem Schritt können sich deshalb andere kürzeste Routen finden lassen. Die gesamte Matrix wird prozentual bei maximal 12 Schritten auf das Netz verteilt. Der Widerstand, hier die aktuelle Reisezeit, wird bei jedem Schritt mit der CR - Funktion ausgewertet. Die Anzahl der Schritte wie auch die einzelnen Prozentsätze können vom Anwender persönlich gewählt werden. Voreingestellt in VISUM sind drei Schritte mit 33%, 33% und 34%. Diese Methode wird dazu verwendet, um einen ersten groben Einblick in die Umlegung und die Routenwahl zu bekommen (vgl.[13]).

2.4.2 Gleichgewichtsumlegung

Diese Methode hat in den früheren Zeiten keine große Beliebtheit erfahren, da viel Rechenleistung notwendig war und die Computer diese Leistung nicht aufbringen oder teils nur nach langer Rechenzeit meistern konnten. Bevor diese Methode aber genauer besprochen wird, muss ein kurzer Exkurs in die Verkehrsplanung unternommen werden. Es gibt zwei Prinzipien. Einerseits gibt es das Nutzeroptimum (1. Wardrop - Prinzip) und andererseits das Systemoptimum (2. Wardrop - Prinzip). Das erste Prinzip beruht darauf, dass die Widerstände auf allen benutzten Routen für alle Verkehrsteilnehmer gleich sind. Auf jeder nicht benutzten Route sind die Widerstände höher. Das heißt, dass es keinen persönlichen Vorteil gibt, wenn man auf eine andere Route umschwenkt. Das zweite Prinzip sagt aus, dass es eine Minimierung des Produktes aus Routenwiderstand und Belastung gibt. Hier gibt es wiederum keinen persönlichen Vorteil, ohne dass nicht mindestens ein anderer einen Nachteil erleidet. Die Gleichgewichtsumlegung verteilt die Nachfrage nach dem ersten Wardrop - Prinzip. Da das Verfahren erst abbricht, wenn sich alle Routen im Gleichgewichtszustand befinden, werden wirklichkeitsnähere Ergebnisse geliefert, als bei der Sukzessivumlegung. Nachteilig sind die hohen Rechenzeiten bei hohen Auslastungen, da bei jedem Iterationsschritt eine neue Route gefunden werden muss. Abbildung 2.16 zeigt das Ablaufschema einer Gleichgewichtsumlegung(vgl.[13]).

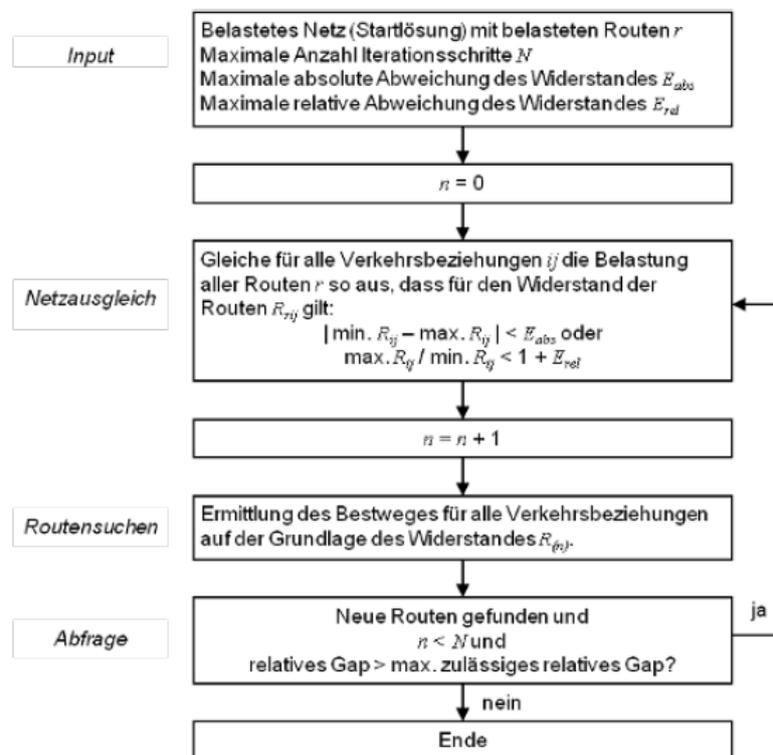


Abbildung 2.16: Ablaufschema der Gleichgewichtsumlegung (vgl. [13])

Die Strecken werden immer paarweise auf ihre Widerstände verglichen. Es gibt mehrere Abbruchkri-

terien:

- Netzausgleich ist erreicht, das heißt, dass eine zulässige Abweichung der Widerstände erreicht bzw. unterboten wurde.
- Die Anzahl der Iterationen, die vom Anwender vorgegeben wird, wurde erreicht (ohne einen Gleichgewichtszustand erreicht zu haben).
- Das Konvergenzkriterium „max. Gap“ wurde erreicht oder unterboten.

2.4.3 Lernverfahren

Das Lernverfahren wurde von Professor Lohse entwickelt und bildet den Lernprozess der Verkehrsteilnehmer bei der Benutzung des Netzes ab (vgl. [13]). Ausgehend von einer 100% Bestwegumlegung beim ersten Iterationsschritt, berücksichtigen die Fahrer die Informationen der letzten Fahrt für die neue Routensuche. Für die Routensuche jedes Iterationsschrittes wird ein geschätzter Widerstand verwendet. Dieser ergibt sich aus dem aktuellen Widerstand bei der aktuellen Belastung und aus dem zuletzt geschätzten Widerstand und wird mit folgender Formel berechnet:

$$Wid_{akt}^* = Wid_{alt}^* + \delta \cdot (Wid_{akt} - Wid_{alt}^*) \quad (2.8)$$

Mit

Wid_{akt}^*	aktuell geschätzter Widerstand
Wid_{alt}^*	zuletzt geschätzter Widerstand
Wid_{akt}	aktueller Widerstand bei aktueller Belastung
δ	Lerngeschwindigkeit

Bei einem kleinen δ lernt das Verfahren langsam und sicher, bei einem zu großen ist die Konvergenz nicht sicher gegeben (vgl.[14]). Dieser Parameter liegt zwischen 0 und 1 und kann als Konstante oder als Variable in das Verfahren eingebracht werden.

Am Anschluss an die Routensuche in jedem Iterationsschritt wird die Nachfrage einer Quelle - Ziel - Beziehung gleichmäßig über alle Routen verteilt. Im Falle, dass eine Route oftmals gefunden wird, wird diese entsprechend ihrer Häufigkeit berücksichtigt. Das Verfahren ist abgeschlossen, wenn die Differenz

zwischen zwei Schritten einen vorgegebenen Wert unterschreitet. Abbildung 2.17 veranschaulicht den Ablauf des statischen Lernverfahrens anhand an einem Beispiel mit zwei Routen.

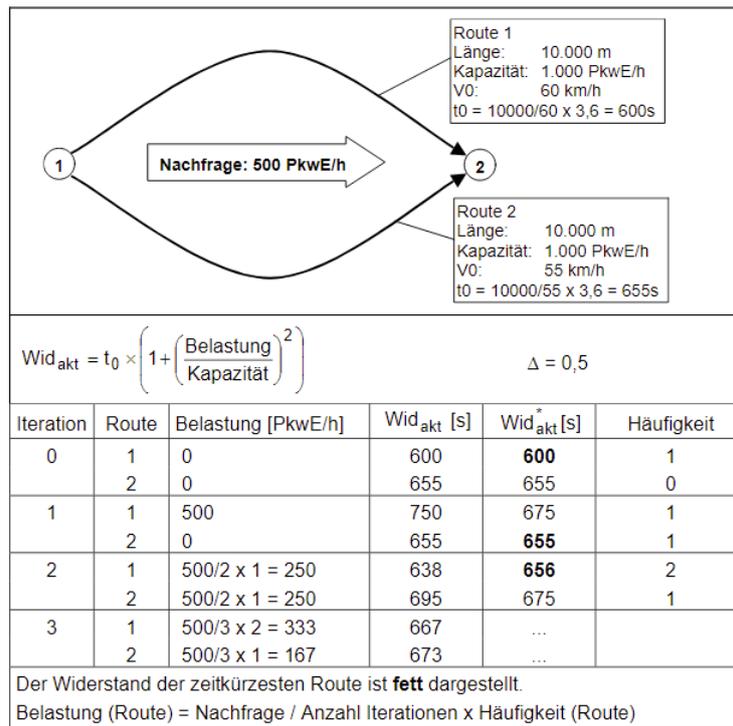


Abbildung 2.17: Beispiel für den Ablauf des statischen Lernverfahrens (vgl. [14])

2.4.4 Zusammenfassung der einzelnen Verfahren

Im Folgenden werden diese drei Methoden einmal im Verkehrsmodell angewendet und die Rechenzeiten bzw. die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Eingabeattribute der jeweiligen Methoden sind wie folgt. Die Sukzessivumlegung wird mit vier Iterationsschritten mit den Prozentsätzen 40%, 30%, 20% und 10% durchgeführt. Für die Sukzessivumlegung benötigt man ungefähr vier Minuten. Die Gleichgewichtsumlegung benötigt rund 35 min und wenn man das Modell im Lernverfahren umlegt, benötigt man rund fünf Minuten. Bei diesen beiden Verfahren wird mit 20 Iterationsschritten gerechnet. Je höher die Anzahl der Schritte desto länger wird die Rechenzeit. Das Lernverfahren wurde nochmalig mit 40 Iterationen gerechnet und man kommt hierbei auf ganze 15 min. Dies ist die doppelte Anzahl an Schritten aber die dreifache Rechenzeit. Das sukzessive Umlegen eignet sich für einen groben Überblick des Netzes. Falls man aber auf detaillierte Ergebnisse spezialisiert, greift man zum Lernverfahren, da hier mehr alternative Routen gefunden werden. Dieses Verfahren arbeitet sehr genau und die Rechenzeit ähnelt die der sukzessiven Umlegung. Das Gleichgewichtsverfahren benötigt zu viel Rechenzeit und wird daher für diese Arbeit als Möglichkeit gestrichen.

3 | Methodik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der schrittweisen Vorgehensweise in dieser Arbeit. Hierbei geht es darum, die Fahrzeugdaten aus den mikroskopischen Simulationen in das makroskopische Modell zu transportieren. Am Ende der Arbeit sollen Kenngrößen dabei helfen, den Unterschied zwischen menschlich gesteuerten (SAE Stufe 0) und hochautomatisierten Fahrzeugen (SAE Stufe 4) aufzuzeigen.

3.1 Vorgehensweise

Um am Ende Kenngrößen ermitteln und analytisch gegenüberzustellen, sind mehrere Schritte notwendig. Diese sind in der folgenden Abbildung 3.1 abgebildet und werden im Verlaufe dieses Kapitels näher erläutert. Zu Beginn werden die verschiedenen Varianten aufgezeigt, die zur Ermittlung der Kapazität herangezogen werden. Danach werden die Funktionsparameter für die CR - Kurven geschätzt. Die Adaptierung des österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetzes wird im nächsten Kapitel (siehe Kapitel 4) näher erläutert. Die Ergebnisse und schlussendlich die makroskopischen Kenngrößen findet man in Kapitel 5.

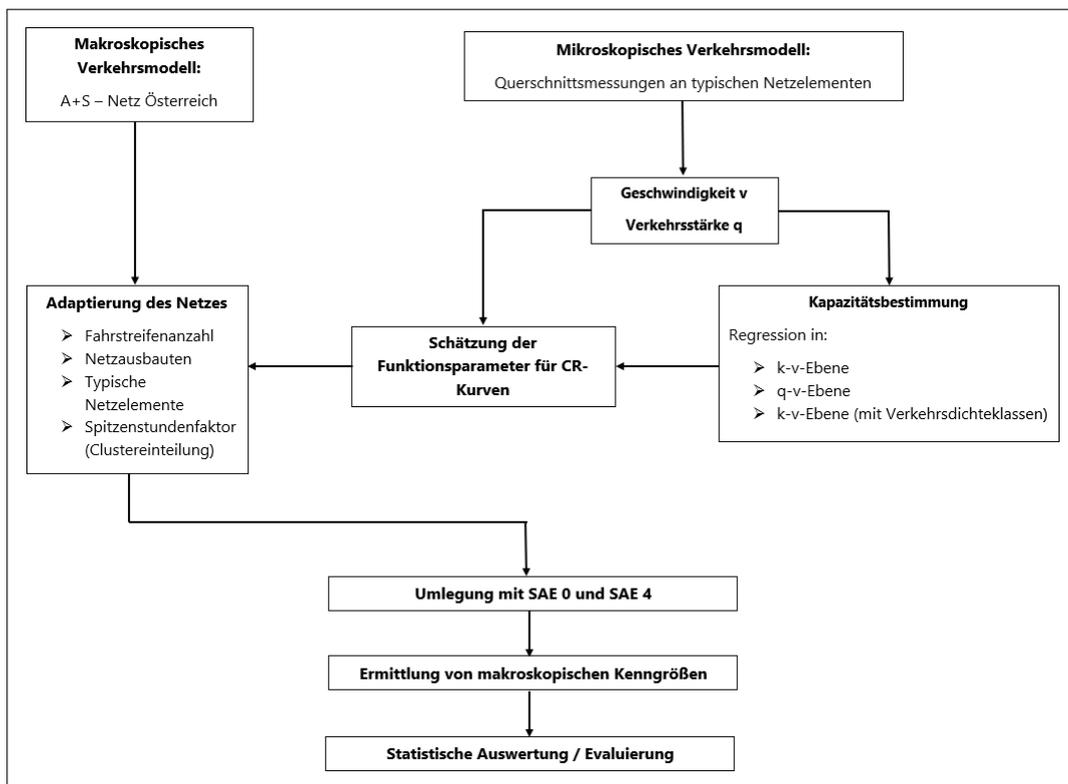


Abbildung 3.1: Flussdiagramm zur Methodik dieser Arbeit

3.2 Ermittlung der Kapazität

3.2.1 Kapazitätsbestimmung nach RVS

Bevor die verschiedenen Varianten zur Ermittlung der Kapazität erklärt werden, wird in diesem Unterkapitel ein kurzer Exkurs in die RVS (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) gegeben. Das Thema Kapazität wird in der Richtlinie RVS 03.01.11 behandelt. Dort wird statt des Begriffes Kapazität der Begriff Leistungsfähigkeit verwendet. Die Leistungsfähigkeit ist die maximale Verkehrsstärke (Kfz/h), die in einem Straßenabschnitt bewältigt werden kann. Diese variiert in der Realität je nach Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer [vgl. [15]]. Die RVS verwendet einen mittleren zu erwartenden Wert als Leistungsfähigkeit und wird mit folgender Formel berechnet:

$$L = -20 + 1969 \cdot FStr - 33 \cdot SV \quad (3.1)$$

Mit

L Leistungsfähigkeit der Richtungsfahrbahn [Kfz/h]

$FStr$ Anzahl der Fahrstreifen

SV Schwerverkehrsanteil [%]

Die Leistungsfähigkeit wird mit einer sehr einfach gehaltenen Formel berechnet und ist nur von der Anzahl der Fahrstreifen und dem Schwerverkehrsanteil abhängig. Diese Formel bezieht sich aber nur auf mehrstreifige Richtungsfahrbahnen wie Autobahnen und Schnellstraßen. Bei Steigungen über 2% werden diese Werte mit einem Faktor abgemindert (siehe Tabelle 3.1).

Steigung s [%]	Schwerverkehrsanteil SV [%]		
	0	10	20
$s \leq 2$	0%	0%	0%
$2 < s \leq 4$	5%	7,5%	10%
$s > 4$	10%	15%	20%

Tabelle 3.1: Abminderung der Leistungsfähigkeit aufgrund der Steigung

Da man aber auf Österreichs Autobahnen selten eine Steigung über 2 % finden kann, werden die Werte in der folgenden Abbildung als Referenz für die Leistungsfähigkeit von mehrstreifigen Straßenabschnitten ohne Abminderung angenommen.

Schwerverkehrsanteil SV [%]	Anzahl der Fahrstreifen FStr		
	2	3	4
0	3 900	5 900	7 850
10	3 600	5 550	7 500
20	3 250	5 200	7 200

Tabelle 3.2: Leistungsfähigkeit von Richtungsfahrbahnen mit Steigungen bis zu 2%

3.2.2 Ermittlung mittels Fundamentaldiagramm

Wie schon in Kapitel 2.2 schon erklärt kann man Verkehrszustände in einem Fundamentaldiagramm abbilden. Ein Modell, das die drei Zustände des Verkehrs (frei, teilgebunden und gebunden) beschreiben kann und auf einem Ansatz für die Weglücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen basiert, ist das sogenannte van - Aerde Modell. Dieses Modell drückt die Verkehrsdichte in Abhängigkeit der momentanen Geschwindigkeit aus (siehe Formel 3.2).

$$k = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v} \quad (3.2)$$

Mit

- k Verkehrsdichte [Fzg/km]
- v_0 Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss [km/h]
- v momentane Geschwindigkeit [km/h]
- c_1, c_2, c_3 Funktionsparameter

Wenn Wertepaare von Verkehrsdichte und momentaner Geschwindigkeit gefunden werden, dann kann mithilfe des Modells mittels Regressionsanalyse die drei Funktionsparameter bestimmt werden. Die Punktwolke, die durch die Fahrzeugdaten am Querschnitt entstehen, kann durch einen Funktionsverlauf in der $k - v$ - Ebene dargestellt werden. Die Kapazität tritt dann genau am Wendepunkt der Regressionskurve auf und wird mit der Formel von Ponzlet berechnet (siehe Formel 3.3).

$$q_{max} = \frac{-2 \cdot \sqrt{c_2} \cdot \sqrt{c_2 + c_1 \cdot v_0} + c_1 \cdot v_0 + 2 \cdot c_2 + c_3 \cdot v_0^2}{c_1^2 + 4 \cdot c_2 \cdot c_3 + 2 \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot v_0 + c_3^2 \cdot v_0^2} \quad (3.3)$$

Mit

c_1, c_2, c_3 Koeffizienten

v_0 Freifahrtgeschwindigkeit [km/h]

Die vorher erwähnte Regression wird mithilfe der Open - Source Statistiksoftware R - Project durchgeführt. Die Daten aus dem mikroskopischen Modell werden eingelesen und die Schätzung der Funktionsparameter erfolgt mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least - Square - Verfahren). Dabei wird zu einer Datenpunktwolke eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an diesen Punkten verläuft (Minimierung der Fehlerquadrate). Ein exemplarisches Beispiel zeigt die folgende Abbildung 3.2. Hierbei handelt es sich um reale Datenpunkte von der A4 der Ostautobahn.

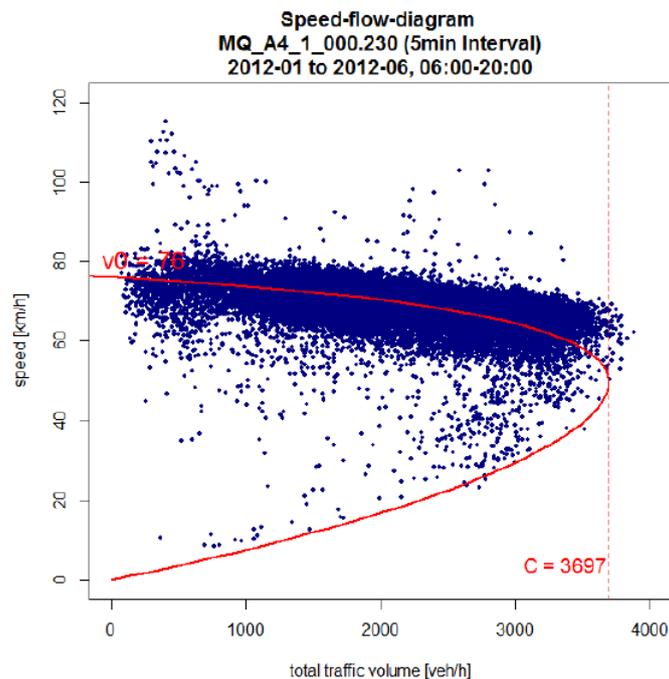


Abbildung 3.2: Kapazität eines 2 - streifigen Querschnitts auf der A4 anhand realer Messdaten (vgl. [16])

Diese Abbildung zeigt das q - v - Fundamentaldiagramm mit der Regressionskurve. Hier präsentiert der Scheitelpunkt der Kurve die Kapazität des Querschnittes.

Die Funktionsweise der Methode besteht darin, die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den Datenpunkten minimiert wird. Für die Kurvenparameter gibt es einen Startwert, den man festlegt und der durch weitere Iterationsschritte optimiert wird. Die Schritte werden so lange durchgeführt bis ein festgelegter Randwert unterschritten wird und keine Optimierung mehr möglich ist.

Die Datenpunkte werden in der Mikrosimulation generiert (zum Beispiel Zähldaten an einem Messquerschnitt) und in einer *.mer Datei gespeichert. Einen Ausschnitt einer solchen Datei kann man in Abbildung 3.3 sehen.

```

Messungsprotokoll (Rohdaten)

Datei: D:\VEGAS\Material\Simulation\Typische Netzelemente\2-streifig\8.2.0-2-streifig_SAE0_Sz.inpx
Kennung:
Datum: Mittwoch, 21. Juni 2017 10:46:45
FTV Vissim 8.00-10 [59682]

Messquerschnitt      1: Strecke      2 Fahrstreifen 1 bei 3052.702 m.
Messquerschnitt      2: Strecke      2 Fahrstreifen 2 bei 3052.702 m.
Messquerschnitt      4: Strecke      2 Fahrstreifen 1 bei 4002.702 m.
Messquerschnitt      5: Strecke      2 Fahrstreifen 2 bei 4002.702 m.
Messquerschnitt      7: Strecke      2 Fahrstreifen 1 bei 4802.702 m.
Messquerschnitt      8: Strecke      2 Fahrstreifen 2 bei 4802.702 m.
Messquerschnitt     10: Strecke      2 Fahrstreifen 1 bei 3602.702 m.
Messquerschnitt     11: Strecke      2 Fahrstreifen 2 bei 3602.702 m.

Messung;   t (Einf);   t (Ausf);   FzNr; Fahrzeugtyp;   Linie; v[km/h]; b[m/s2];   Bel; Pers; tStau; FzLaenge[m];
2;         300.57;   -1.00;     26;    100;    0; 120.2;  0.10;  0.03;  1;  0.0;  4.76;
2;         -1.00;   300.72;     26;    100;    0; 120.3;  0.10;  0.02;  1;  0.0;  4.76;
2;         301.93;   -1.00;     25;    100;    0; 116.4;  0.16;  0.07;  1;  0.0;  4.76;
2;         -1.00;   302.08;     25;    100;    0; 116.5;  0.16;  0.08;  1;  0.0;  4.76;
1;         302.38;   -1.00;     21;    100;    0;  99.4;  0.00;  0.02;  1;  0.0;  4.61;
1;         -1.00;   302.54;     21;    100;    0;  99.4;  0.00;  0.04;  1;  0.0;  4.61;
10;        303.00;   -1.00;     15;   1100;    0;  91.0;  0.00;  0.00;  1;  0.0; 10.22;
10;        -1.00;   303.40;     15;   1100;    0;  91.0;  0.00;  0.10;  1;  0.0; 10.22;
11;        303.43;   -1.00;     18;    100;    0; 106.3;  0.00;  0.07;  1;  0.0;  4.21;
11;        -1.00;   303.58;     18;    100;    0; 106.3;  0.00;  0.08;  1;  0.0;  4.21;
4;         304.85;   -1.00;     20;    100;    0; 126.9;  0.00;  0.05;  1;  0.0;  4.36;
4;         -1.00;   304.97;     20;    100;    0; 126.9;  0.00;  0.07;  1;  0.0;  4.36;
4;         311.36;   -1.00;     14;   1100;    0;  90.1;  0.00;  0.04;  1;  0.0; 10.22;
4;         -1.00;   311.77;     14;   1100;    0;  90.1;  0.00;  0.07;  1;  0.0; 10.22;
1;         314.24;   -1.00;     23;    100;    0;  98.9;  0.00;  0.06;  1;  0.0;  4.21;

```

Abbildung 3.3: Ausschnitt aus einer *.mer - Datei

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Aggregationsintervall. Die Intervalle der Daten haben eine starke Auswirkung auf die Bestimmung der Kapazität. Als Aggregationsintervall wird hier das 5 Minuten Intervall gewählt. Dieses eignet sich sehr gut für die Regressionsanalyse dieser Stichprobe (siehe exemplarisch Abbildung 3.4 und 3.5). Die 1 Minuten Intervalle führen zu einer starke Streuung und die 15 Minuten Intervalle sind einerseits zu stark aggregiert und andererseits reduzieren sich die Datenpunkte für diese Stichprobe. Für die schlussendliche Bestimmung der Kapazität gibt es drei Varianten, die hier kurz erklärt werden.

Variante 1: Regression in der k - v Ebene

Die erste Variante besteht darin die Regressionskurve anhand der Datenpunkte in der k - v - Ebene zu generieren. Vorteil ist hier, dass im k - v - Diagramm zu jedem k - Wert nur ein v - Wert existiert. Am Ende wird die k - v - Kurve wieder in das q - v - Diagramm anhand der fundamentalischen Beziehung (siehe Formel 2.1) transformiert. Das Ergebnis einer solchen Regressionsanalyse kann man in den beiden folgenden Abbildungen 3.4 und 3.5 sehen. Bei dieser Abbildung handelt es sich um einen Querschnitt eines 2 - streifigen Streckenabschnittes.

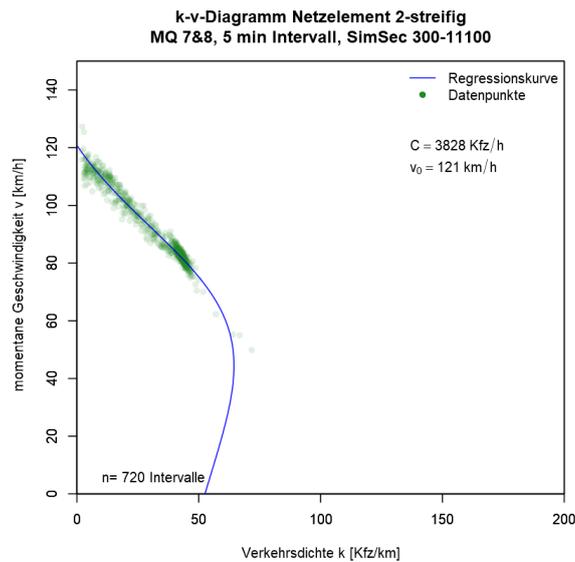


Abbildung 3.4: Kapazität C auf Basis der Daten im k - v - Diagramm

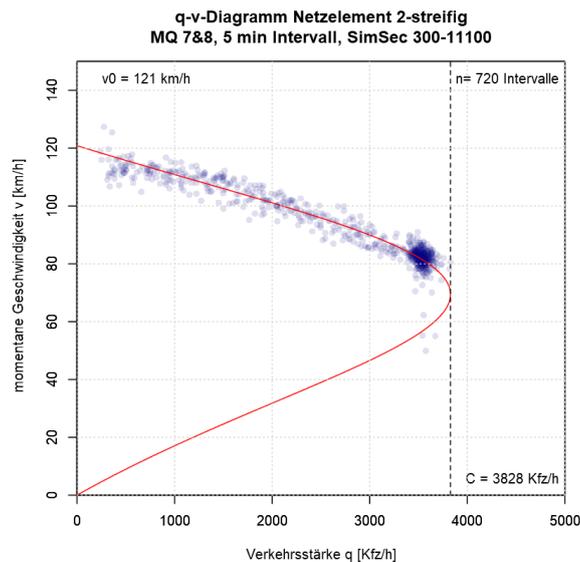


Abbildung 3.5: Transformation der Kurve in die q - v - Ebene

Variante 2: Regression in der q - v - Ebene

Da man die Dichte k laut der umgewandelten van Aerde Funktion (k wird durch q ausgedrückt) nicht für die Kapazitätsbestimmung benötigt, generiert man die Regressionskurve direkt anhand der Datenpunkte in der $q - v$ - Ebene. Es muss also die Formel für die Regressionsanalyse geändert werden (siehe Formel 3.4).

$$q = \frac{v}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v} \quad (3.4)$$

Die nächste Abbildung zeigt denselben Querschnitt wie in den Abbildungen davor. Die Kapazitätsänderung in diesem exemplarischen Beispiel ist deutlich zu sehen.

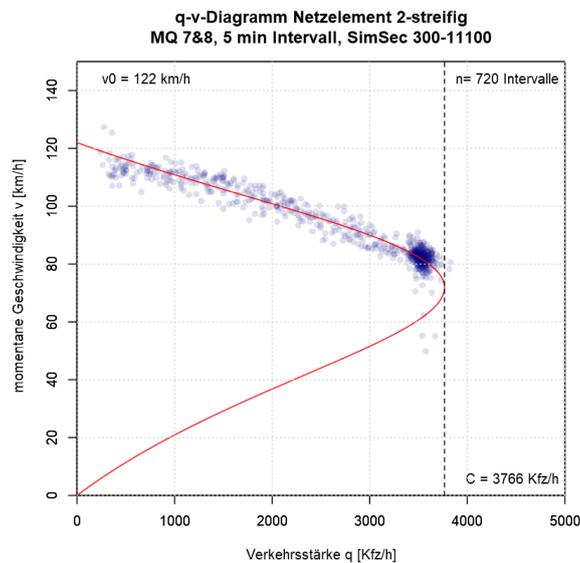


Abbildung 3.6: Kapazität C auf Basis der Daten im $q - v$ - Diagramm

Nachteilig an dieser Variante ist, dass im $q - v$ - Diagramm zu jedem y - Wert zwei x - Werte (hier: zwei verschiedene Geschwindigkeiten zu einer Verkehrsstärke) existieren. Damit entsteht ein weiterer Freiheitsgrad in der Regression. Es sind trotzdem plausible Ergebnisse bei den Untersuchungen in dieser Arbeit erzielt worden. Ein weiterer Nachteil der beiden erwähnten Varianten ist, dass die Verkehrszustände freier Verkehr und gebundener Verkehr anhand der Datenpunktwolke gleich abgebildet sein sollte. Wie man an der Abfahrt 2 - 1RA sehen kann, sind die Datenpunkte sehr gut verteilt. Das Problem entsteht auf einer freien Strecke. Da die Fahrzeuge zu keinem Knotenpunkt oder Verengung kommen, ist es sehr schwierig Datenpunkte im gebundenen Verkehr zu erzeugen. Bei SAE - Level 0 kann es dennoch durch menschliches Fahrverhalten zu diesem Verkehrszustand kommen. Problema-

tisch wird es im hochautomatisierten Bereich, da man hier diese Komponente nicht mehr vorliegen hat. Die folgende Abbildung 3.7 veranschaulicht den Unterschied zwischen den beiden Levels auf einem 3 - streifigen Querschnitt.

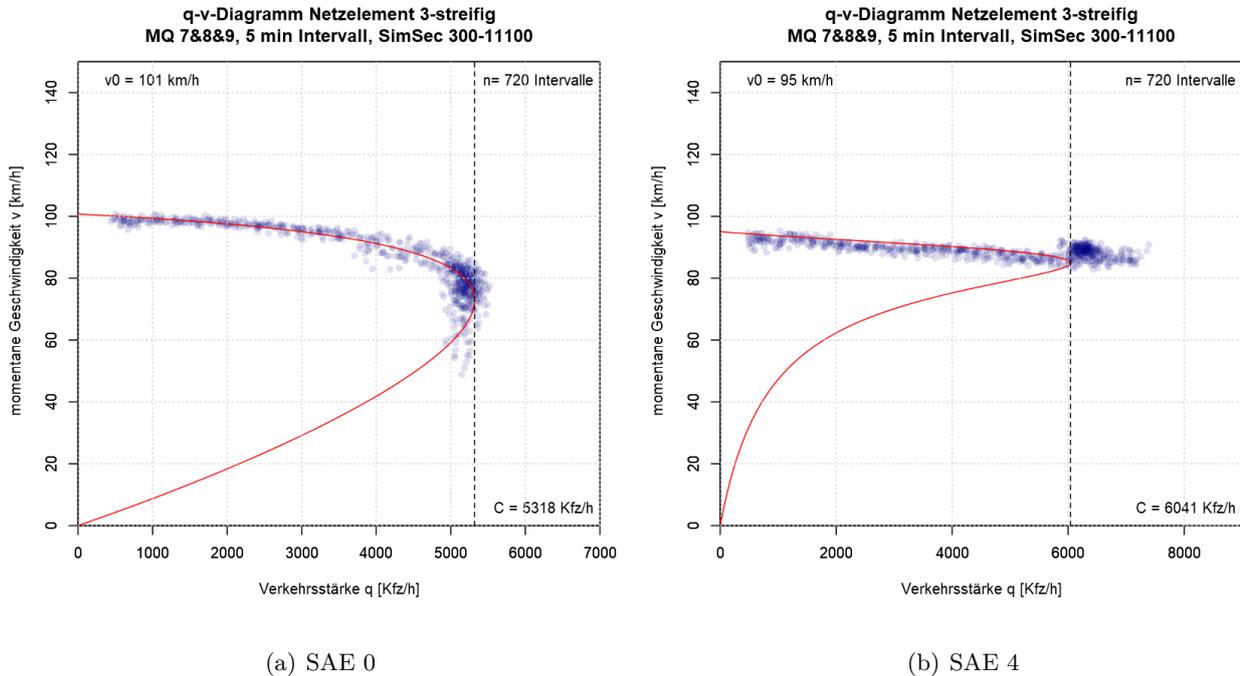
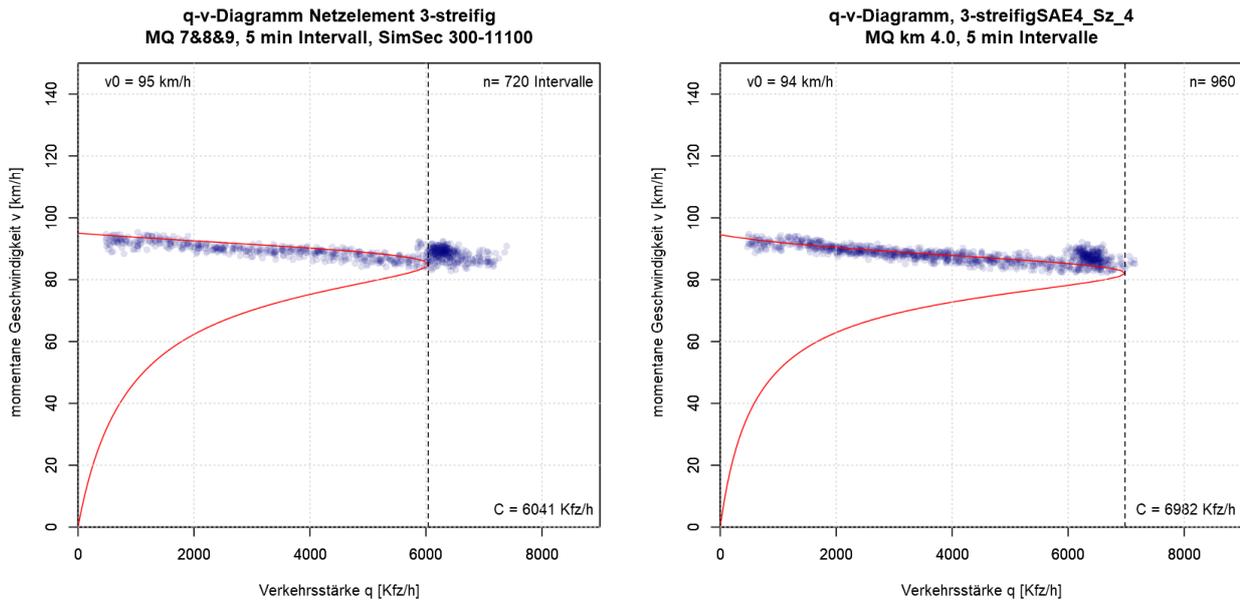


Abbildung 3.7: Unterschied der SAE - Levels bei Kapazitätsermittlung

Bei Level 0 hat man genug Datenpunkte im gebundenen Teilbereich und auch deshalb erzielt man gute Ergebnisse in der Kapazitätsermittlung. Bei Level 4 sieht man, dass die Kapazität zu gering ausfällt. Hier sind noch zu viele Datenpunkte über diesem Wert zu finden. Bei anderen Querschnitten und Netzelementen erzielt man keine Ergebnisse und deshalb muss auf eine andere Variante zurückgegriffen werden.

Variante 3: Regression in der $k - v$ - Ebene anhand Verkehrsdichteklassen

Um das beschriebene Problem von Variante 2 zu beheben, wird die dritte Variante mit den Verkehrsdichteklassen angewendet. Hierzu werden die einzelnen Datenpunkte im $k - v$ - Diagramm den einzelnen Verkehrsdichtegruppen zugewiesen. Das heißt, dass man zu jeder Verkehrsdichte nur einen Geschwindigkeitswert hat. Dadurch wird der Bereich des freien Verkehrs, der sehr viele Datenpunkte beinhaltet, weniger stark repräsentiert und der gestaute Bereich vergleichsweise höher gewichtet. Dies führt dazu, dass man auch auf den freien Strecken zu brauchbaren Ergebnissen kommt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Unterschied zwischen der Variante 2 und 3 des 3 - streifigen Querschnitts bei SAE Level 4.



(a) Variante 2

(b) Variante 3

Abbildung 3.8: Variantenunterschied in der Kapazitätsermittlung

Die Vorgehensweise dieser Variante ist dieselbe wie bei Variante 1. Man bestimmt die Regressionskurve anhand der Datenpunkte in der $k - v$ -Ebene, ermittelt die Verkehrsdichteklassen und letztendlich transformiert man diese Kurve durch die Formel 2.1 in die $q - v$ -Ebene. Die Verkehrsdichteklassen werden so bestimmt, dass man pro Fzg/km einen Punkt in der $k - v$ -Ebene ermittelt. Dies ist der Median aller Datenpunkte, die den Wert 1 Fzg/km als Verkehrsdichte aufweisen.

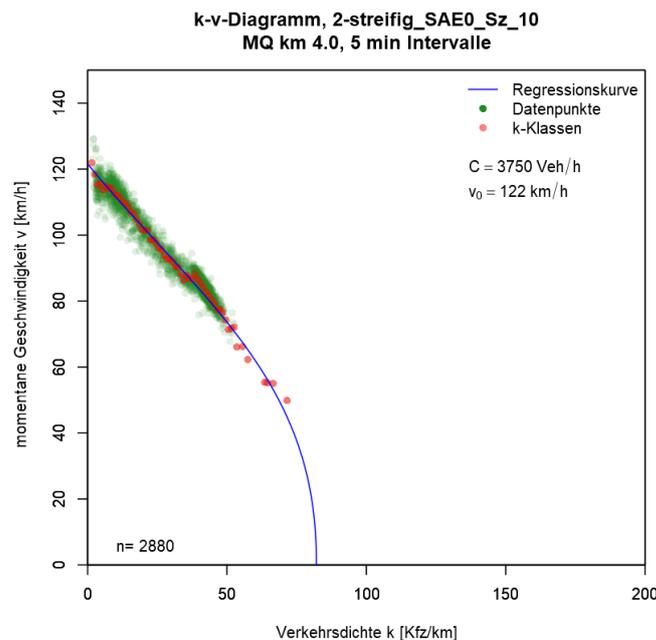


Abbildung 3.9: Unterteilung der Datenpunkte in die einzelnen Verkehrsdichteklassen

Die roten Punkte repräsentieren die Dichteklassen und die Regressionskurve wird nur noch nach diesen Punkten ermittelt. Abschließend wird noch der Unterschied der Varianten anhand des Netzelementes 2 - 1RA aufgezeigt (siehe Abbildung 3.10).

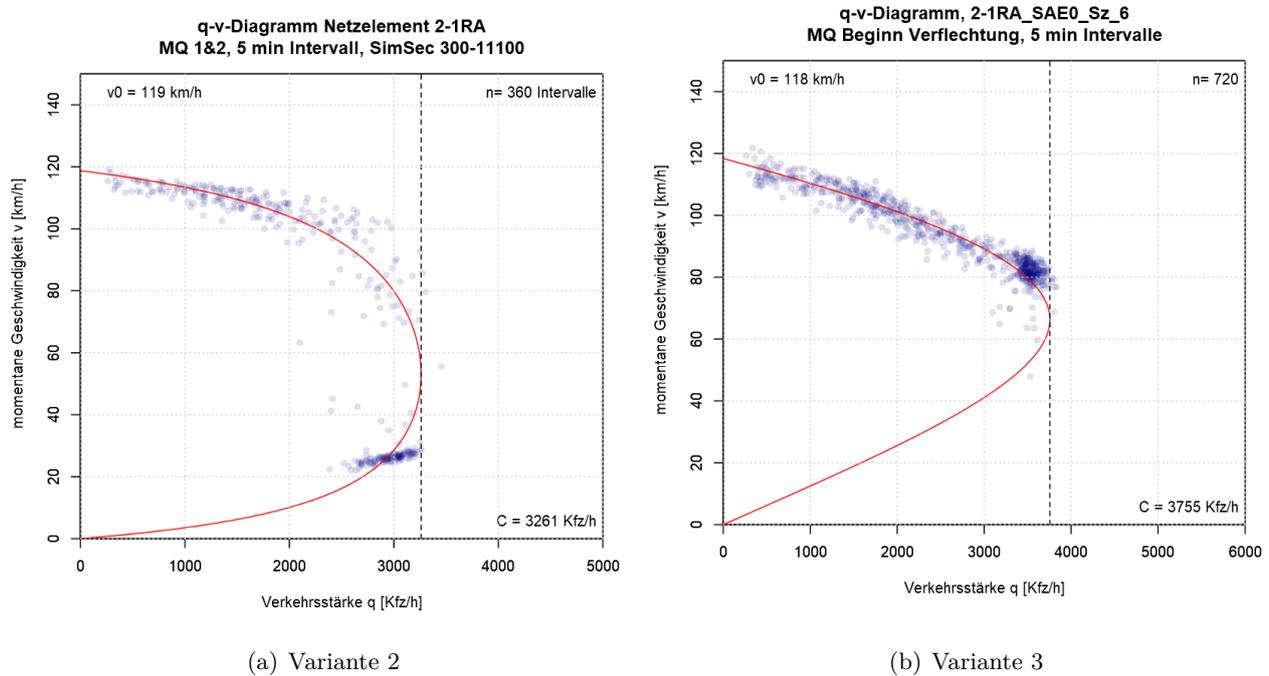


Abbildung 3.10: Variantenunterschied in der Kapazitätsermittlung für das Netzelement 2 - 1RA

3.2.3 Vorgehen bei der Bestimmung der Kapazität

Nach der Vorstellung dieser drei Varianten und deren Gegenüberstellung werden nochmals kurz die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten zusammengefasst. Für die weiteren Ergebnisse und Ermittlungen ist es wichtig, dass man sich für eine einzige Variante entscheidet. Der Nachteil der ersten Variante ist, dass man die Regression mit den Datenpunkten in der $k - v$ - Ebene durchführt, die für die Ermittlung der Kapazität nicht unbedingt vonnöten ist. Die Datenpunkte in der wichtigsten Ebene ($q - v$) werden hierbei nicht berücksichtigt. Bei der zweiten Variante besteht das Problem, dass, wie schon vorher erwähnt, man immer zwei x - Werte zu einem y - Wert benötigt. Das führt dazu, dass man im Allgemeinen eher zu niedrige Kapazitäten ermittelt und bei SAE 4 teilweise zu keinen Ergebnissen kommt. Variante 3 beseitigt dieses Problem mit den beiden x - Werten. Dennoch ist die Kapazität C immer noch zu niedrig und deshalb müssen gewisse Randbedingungen eingebracht werden. Dazu werden Bedingungen formuliert um das Ergebnis der Kapazitätsberechnung in eine gewisse Richtung und näher an realistische Beobachtungen zu lenken. Diese Randbedingungen sind wie folgt:

- C ist bestimmbar und liegt im 90 - 99% - Quantil $\rightarrow C$ ist bestimmter Wert
- C ist bestimmbar aber liegt über bzw. unter diesem Quantilsbereich \rightarrow es wird der 99% - Quantil

für die zu hohe Kapazität und der 90% Quantil für die zu niedrigen Kapazitäten genommen.

- Falls C nicht bestimmbar ist → es wird der 99% - Quantil für C verwendet

Dabei geht es in allen Fällen um das Quantil der Datenpunkte. Das heißt es dürfen maximal 1% der Datenpunkte über und 89% unter der ermittelten Kapazität liegen. Nur diese Werte werden als Ergebnisse toleriert. Die Bedingungen werden in das Skript in R - Project eingebracht, damit man sofort die gesuchten Kapazitäten ermittelt. Diese Vorgehensweise ist dieselbe wie bei SAE 4, nur gibt es hier anders formulierte Randbedingungen, die wie folgt aufgezeigt werden:

- C ist bestimmbar und liegt im 90 - 99% - Quantil → C ist bestimmter Wert
- C ist bestimmbar aber liegt über bzw. unter diesem Quantilsbereich → es wird der Quantilwert wie bei Level 0 verwendet.
- Falls C nicht bestimmbar ist → es wird wiederum der Quantilwert von Level 0 verwendet

Die ermittelten Kapazitäten können aber nicht mit denen des Verkehrsmodelles oder Richtlinien verglichen werden, weil es sich hierbei nicht um Stundenwerte handelt, sondern um aggregierte Werte im 5 min Intervall. Daher müssen die berechneten Werte entsprechend für einen Vergleich umgerechnet werden. Verschiedene Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Faktor zwischen Stundenkapazitäten und feineren Intervallen (z.B. vgl. [17]). Martin Ponzlet hat dies untersucht und ist schlussendlich auf einen mittleren Faktor von 0,85 zwischen den Bezugsintervallen von 5 Minuten und 60 Minuten gekommen (vgl. [17]). Das heißt, dass die Stundenkapazität dem 85%-igen Wert der ermittelten 5 min - Kapazität entspricht.

3.2.4 Simulationsszenarien im mikroskopischen Verkehrsmodell

Im Folgenden werden die verschiedenen Simulationszenarien, die in der Mikrosimulation durchgeführt wurden, näher erklärt. Es wurden typische Netzelemente, in Anlehnung an die HBS (Handbuch zur Bemessung von Straßen (vgl. [18])), ausgesucht, die sehr häufig im hochrangigen Straßennetz Österreichs vorkommen. Ein Netzelement ist zum Beispiel durch die Fahrstreifenanzahl oder durch Ein- bzw. Ausfahrt definiert. Die Zusammensetzung der Bezeichnungen für die Anschlussstellen (z.B.: 2 - 1RA) ist wie folgt zu verstehen. Die erste Zahl in dieser Bezeichnung zeigt die Fahrstreifenanzahl auf der Hauptfahrbahn. Das Minuszeichen oder Pluszeichen gibt an ob es sich um eine Ausfahrt oder Einfahrt auf die Autobahn handelt. Dies sieht man auch an den letzten beiden Buchstaben der Bezeichnung RA (Rampenausfahrt) und RE (Rampeneinfahrt). Die Zahl vor den beiden Buchstaben präsentiert die Fahrstreifenanzahl der Rampe. 2 - 1RA steht also letztendlich für eine 1 - streifige Ausfahrt von

einer 2 - streifigen Hauptfahrbahn. In Abbildung 3.11 kann man die Netzelemente sehen, die auch in der mikroskopischen Simulation untersucht wurden.

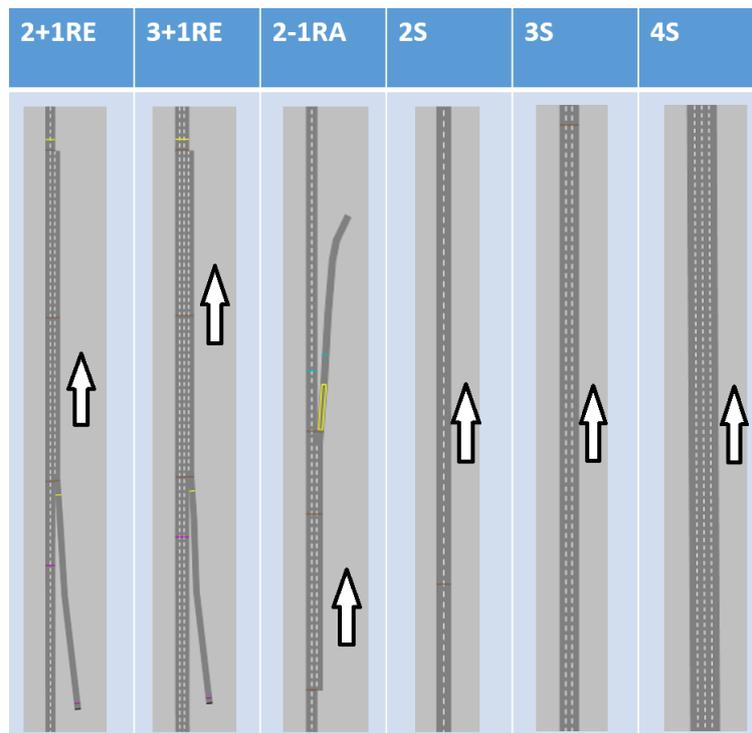


Abbildung 3.11: Simulierte typische Netzelemente

Im gesamten Streckennetz Österreichs sind auch noch weitere Einfahrts- bzw. Ausfahrtstypen zu finden. Für dieses Projekt wurden die wichtigsten und häufigst vorkommenden Typen ausgesucht und simuliert. In Kapitel 4.3 wird auch auf diese eingegangen.

Als nächsten Schritt ist es wichtig, verschiedene Szenarien dieser Netzelemente zu untersuchen. Da auf Österreichs Autobahnen verschiedene Geschwindigkeitsbegrenzungen gelten, müssen diese auch bei der Simulation berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeit ist ein großer Faktor für die Leistungsfähigkeit einer Strecke. Für die freien Strecken (2 - streifig, 3 - streifig und 4 - streifig) gibt es jeweils 9 Szenarien. Es werden unterschiedliche Geschwindigkeiten (130 km/h, 100 km/h und 80 km/h) betrachtet und zu diesen kommen noch drei unterschiedliche Schwerverkehrsanteile (5%, 10%, 15%) hinzu. In der folgenden Tabelle findet man diese 9 Szenarien, deren Zusammensetzung und Bezeichnung.

Szenarionr.	Bezeichnung	freie Strecken	
		Geschw. [km/h]	SV - Anteil [%]
1	v130_15	130	15
2	v130_10		10
3	v130_5		5
4	v100_15	100	15
5	v100_10		10
6	v100_5		5
7	v80_15	80	15
8	v80_10		10
9	v80_5		5

Tabelle 3.3: 9 Szenarien unterteilt in Geschwindigkeit und SV - Anteil

Die modellierten Strecken in der mikroskopischen Simulation haben eine gewisse Freifahrtgeschwindigkeit, die der Geschwindigkeit der einzelnen Szenarien entspricht. Jedes Szenario wird dann schlussendlich 20 mal mit unterschiedlichen Zufallszahlen simuliert. Diese Zahl beeinflusst das Einfahrverhalten der Fahrzeuge in die modellierte Strecke. Mit den 20 Durchläufen erreicht man eine Mittelung der Ergebnisse bzw. des Fahrverhaltens und eine genügend große Stichprobe für die Kapazitätsbestimmung. Für die Strecken im Bereich der Autobahnanschlussstellen gibt es jeweils 27 Szenarien. Neben den Geschwindigkeiten und den Schwerverkehrsanteilen kommen noch die einzelnen Belastungsverhältnisse hinzu. Die Belastungsverhältnisse oder auch im Folgenden G - Stufen genannt repräsentieren das Verhältnis der Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn zu der Stärke auf der Ein - bzw. Ausfahrt. Die Kapazität eines Knotenpunktes ist stark abhängig von diesem Belastungsverhältnis (siehe Formel 3.5).

Szenariornr.	Bezeichnung	Ein - bzw. Ausfahrten			
		Geschw. [km/h]	SV - Anteil [%]	Belastungsverhältnis	
1	v130_15_G1-2	130	15	1 - 2	
2	v130_15_G3-4			3 - 4	
3	v130_15_G5-6			5 - 6	
4	v130_10_G1-2		10	10	1 - 2
5	v130_10_G3-4				3 - 4
6	v130_15_G5-6				5 - 6
7	v130_5_G1-2		5	5	1 - 2
8	v130_5_G3-4				3 - 4
9	v130_5_G5-6				5 - 6
10	v100_15_G1-2	100	15	1 - 2	
11	v100_15_G3-4			3 - 4	
12	v100_15_G5-6			5 - 6	
13	v100_10_G1-2		10	10	1 - 2
14	v100_10_G3-4				3 - 4
15	v100_10_G5-6				5 - 6
16	v100_5_G1-2		5	5	1 - 2
17	v100_5_G3-4				3 - 4
18	v100_5_G5-6				5 - 6
19	v80_15_G1-2	80	15	1 - 2	
20	v80_15_G3-4			3 - 4	
21	v80_15_G5-6			5 - 6	
22	v80_10_G1-2		10	10	1 - 2
23	v80_10_G3-4				3 - 4
24	v80_10_G5-6				5 - 6
25	v80_5_G1-2		5	5	1 - 2
26	v80_5_G3-4				3 - 4
27	v80_5_G5-6				5 - 6

Tabelle 3.4: 27 Szenarien unterteilt in Geschwindigkeit, SV - Anteil und Belastungsklassen

Das Verhältnis aus Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn und der Ein- bzw. Ausfahrt wird durch den Faktor f ausgedrückt:

$$f = \frac{q_{HFB}}{q_{E/A}} \quad (3.5)$$

Mit

q_{HFB} Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn [Kfz/h]

$q_{E/A}$ Verkehrsstärke der Ein - bzw. Ausfahrt [Kfz/h]

Die Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn ist jene, die vor/nach der Einfahrt/Ausfahrt zu finden ist. Hier herrscht somit die eingehende oder ausgehende gesamte Verkehrsstärke an einem Knotenpunkt. Die Belastungsverhältnisse der einzelnen Stufen sind der folgenden Tabelle 3.5 zu entnehmen (in Anlehnung an [18]).

Stufe	HFB [%]	E/A [%]	Belastungsverhältnis
G 1	60	40	1,50
G 2	68	32	2,13
G 3	77	23	3,35
G 4	83	17	4,88
G 5	88	12	7,33
G 6	94	6	15,67

Tabelle 3.5: Übersicht der Belastungsverhältnisse

Die Belastungsverhältnisse kann man in der Mikrosimulation über die Zuflussverkehrsstärke an den einzelnen Strecken steuern. Bei der Abfahrt muss man das Abbiegeverhalten der Fahrzeuge ändern, damit ein gewisser Prozentsatz des gesamten Verkehrs auf der Strecke auch von der Hauptfahrbahn abfahren. Im Rahmen der Arbeit wurden die 6 Stufen auf 3 Stufen reduziert. Der folgenden Tabelle 3.6 kann man diese gemittelten Belastungsverhältnisse entnehmen.

Stufe	HFB [%]	E/A [%]	Belastungsverhältnis
G 1 - 2	64	36	< 2,74
G 3 - 4	80	20	2,74 - 6,11
G 5 - 6	91	9	> 6,11

Tabelle 3.6: gemittelte 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 Fahrzeuzeugerzeugung. Das gewählte Vorgehen basiert auf der Methodik, die für das Projekt HBS - konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen (vgl. [18]) 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- bzw. Ausfädelungstreifens zu berücksichtigen:

$$p_{q,i} = n_{E/A} \cdot \frac{n_{HFB}}{(n_{HFB} - 0,5)} \cdot p_i \quad (3.6)$$

Mit

- p_q Belastungsverhältnis in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt
- i Index für die Belastungsverhältnisse 1 bis 6 (Geraden in Abbildung 3.12)
- $n_{E/A}$ Anzahl der Fahrstreifen in der Ausfahrt bzw. Einfahrt
- n_{HFB} Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn stromaufwärts von Einfahrten bzw. stromabwärts von Ausfahrten oder Verflechtungsstrecken
- p_i Hilfsgröße: G1: 100%, G2: 70%, G3: 45%, G4: 30%, G5: 20%, G6: 10%

Die sechs Geraden, die sich aus den Belastungsverhältnissen ergeben, sind beispielhaft für das Netzelement 2+1RE in Abbildung 3.12 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 (G1 - Kurve in Abbildung 3.12) des Bemessungsdiagramms nach HBS 2015 (vgl. [18]).

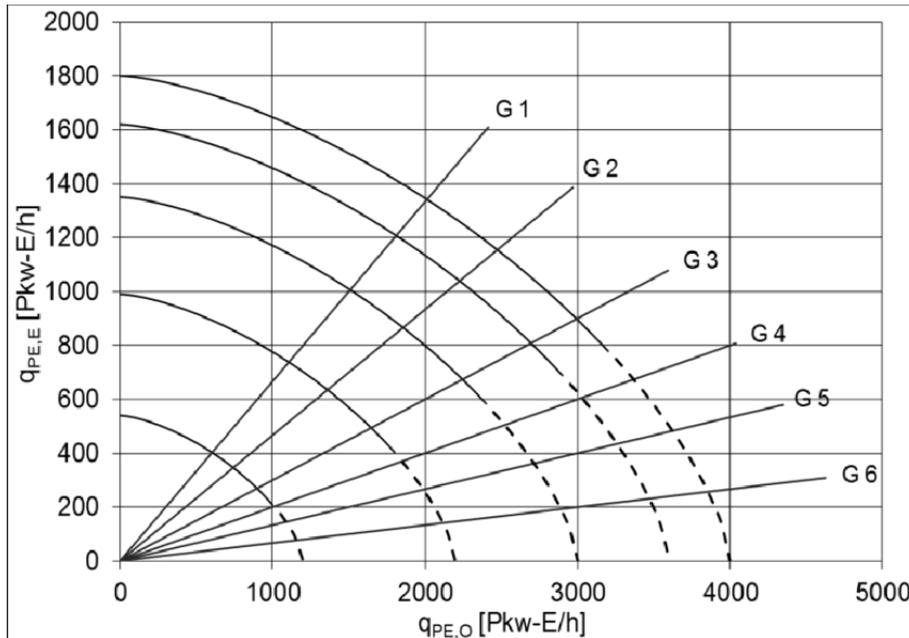


Abbildung 3.12: Belastungsverhältnisse einer Einfahrt 2+1RE

3.3 Auswertung der CR - Kurven

Mit der ermittelten Kapazität kann man streckentypfeine CR - Kurven bestimmen. In der nächsten Abbildung wird ein kurzer Überblick geboten, wie die Methodik zur Schätzung dieser Widerstandsfunktionen aussieht.

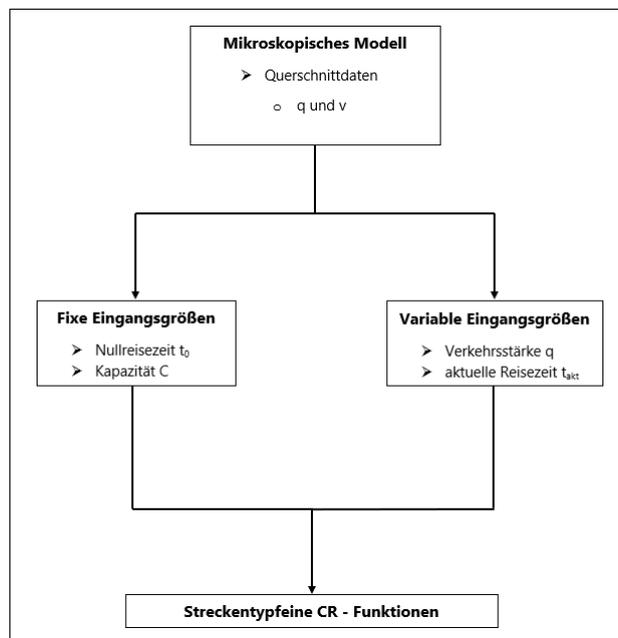


Abbildung 3.13: Ablaufschema zur Schätzung von CR - Funktionen

Wie man an der Abbildung sehen kann, ist der Ablauf zur Schätzung einer CR - Kurve in drei Schritte

eingeteilt. Der erste Schritt besteht aus der Datenquelle. Diese stammt aus den Simulationen, wie schon bei der Kapazitätsermittlung von den sogenannten *.mer - Dateien. Aus diesen Dateien sind die Größen wie lokale Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke q auszulesen. Die fixen Eingangsgrößen sind die Reisezeit im unbelasteten Netz (Nullreisezeit) t_0 und die Kapazität C der Strecke. Die Nullreisezeit wird durch die Freifahrtgeschwindigkeit v_0 bezogen auf einen 1 km langen Abschnitt im Bereich des Querschnittes berechnet:

$$t_0 = \frac{1000}{v_0} \quad (3.7)$$

Die Größe v_0 ist die Freifahrtgeschwindigkeit und ist jene die auf der unbelasteten Strecke gefahren werden kann.

Die zweite Größe, die Kapazität, wird wie im vorigen Kapitel besprochen, ermittelt. Die beiden variablen Größen Verkehrsstärke q und aktuelle Reisezeit t_{akt} können direkt aus den Dateien entnommen werden. Die aktuelle Reisezeit ergibt sich durch die gleiche Formel wie vorhin (siehe Formel 3.7). Hier wird anstatt der Freifahrtgeschwindigkeit v_0 die gefahrene Geschwindigkeit v_{akt} im belasteten Netz eingesetzt. Die beiden Größen sind deshalb variabel, da pro Querschnitt ein Wertepaar dieser beiden Größen existiert.

Mit dem Wissen dieser Werte kann schlussendlich in die Regressionsanalyse gestartet werden. Hierbei ist die gleiche Vorgehensweise wie bei der Kapazitätsermittlung (siehe Kapitel 3.2.2). Man versucht die Parameter der drei vorgestellten CR - Funktionen (siehe Kapitel 2.3) so zu wählen, dass man die Datenpunkte aus der mikroskopischen Simulation passend abbilden kann. Hierbei wird auch das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate angewendet. Der große Unterschied zu der Kapazitätsermittlung ist es, dass die CR - Funktionen nur noch für freie Strecken ausgewertet werden und es hierbei eine Unterteilung in 3 verschiedene Szenarien gibt, die sich im Wert der Geschwindigkeit unterscheiden. Der Hintergrund dieser Durchführung liegt im Programm für die makroskopische Modellierung und wird in Kapitel 4.6 erklärt. Da aber die Kapazität aus den vorher durchgeführten Szenarien ermittelt wurde, gibt es noch die unterschiedlichen SV - Anteile zu beachten, die bei den CR - Funktionen auch entfallen. Hierbei gibt es 2 Varianten, wie diese Anteile berücksichtigt werden und sind im Folgenden näher erläutert:

Variante 1: CR - Funktionen mit 10 % SV - Anteil

Die Szenarien, die simuliert wurden, enthalten 5 %, 10 % und 15 % Schwerverkehrsanteile. Die erste Variante besteht darin, dass man den mittleren Wert der drei Anteile für die Ermittlung der CR - Funktionen verwendet. Dies würde somit auch ein gemittelttes Ergebnis zur Folge haben. Der Nachteil

ist der, dass auf Österreichs Straßen verschiedenste Anteile an Schwerverkehr unterwegs sind und somit diese Variante realitätsfern sein wird.

Variante 2: CR - Funktionen mit allen SV - Anteilen

Aus diesem Grund wird die Variante 2 eingeführt. Man verwendet alle Daten einer freien Strecke, vorausgesetzt mit der gleichen Geschwindigkeit, und erstellt ein neues Szenario. Wenn man sich nochmals die Tabelle 3.3 ansieht werden die ersten drei Szenarien zu einem neuen Szenario zusammengefügt. Somit bekommt man eine Datenquelle, in der alle SV - Anteile abgebildet sind. Der Vorteil, der hier auch zum Tragen kommt, ist die größere Anzahl an Datenpunkten. Je mehr Datenpunkte zur Verfügung stehen, desto leichter wird es eine passende Regressionskurve schätzen zu können. Aus diesem Grund wird auch für diese Arbeit die Variante 2 bevorzugt und für die weiteren Ergebnisse verwendet. Die folgenden Abbildungen zeigen den Unterschied dieser beiden Varianten anhand eines exemplarischen Beispiels auf.

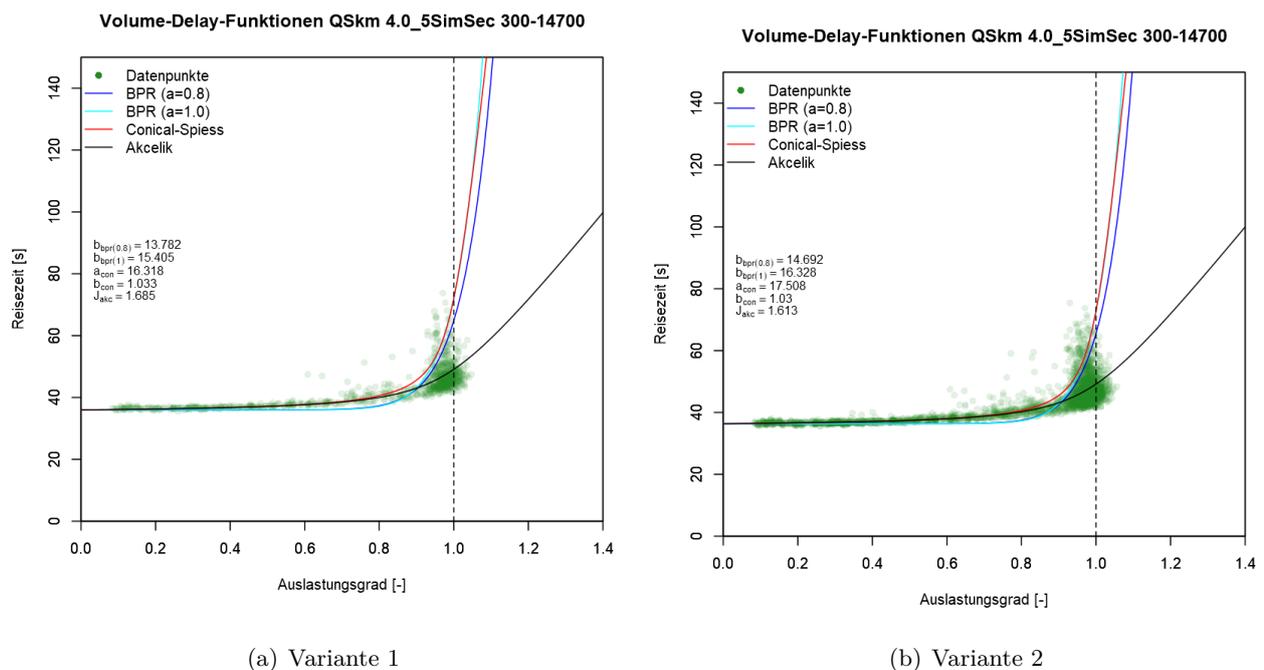


Abbildung 3.14: Unterschied der beiden Varianten bei der Ermittlung von CR - Funktionen

Die Unterschiede der Parameter sind sehr deutlich und somit ist die Wahl der Variante auch für Ermittlung der CR - Funktionen entscheidend. Die Auslastung a , die bei den Abbildungen auf der x - Achse aufgetragen wird, kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$a = \frac{q}{q_{max}} \quad (3.8)$$

Wie schon bei den Kapazitätsermittlungen (siehe Kapitel 3.2.2), treten Probleme bei der Ermittlung der Parameter bei der SAE - Stufe 4 auf. In der folgenden Abbildung sieht man ein exemplarisches Beispiel eines 4 - streifigen Querschnittes bei einer Freifahrtgeschwindigkeit von 100 km/h.

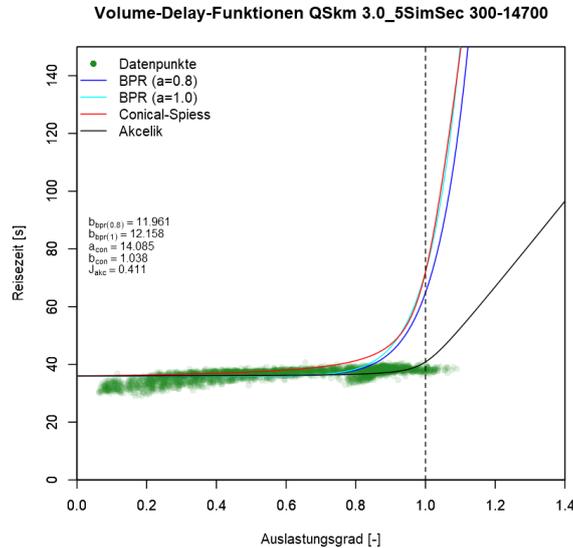


Abbildung 3.15: CR - Funktionen eines 4 - streifigen Querschnittes (SAE 4)

Die Datenpunkte zeigen, dass es zu keiner Reisezeitzunahme in den Datenpunkten bei erhöhter Auslastung kommt. Da CR - Funktionen sind aber so aufgebaut, dass ein stetiger und ab der Auslastungsgrenze ein starker Anstieg der Reisezeit vorliegt, kann man die Datenpunkte des hochautomatisierten Fahrens nur schwer abbilden. Um dem entgegenzuwirken wurden zwei Varianten im Zuge dieser Arbeit theoretisch untersucht und werden im Folgenden näher erklärt.

Änderung der Auslastungsformel

Die erste Variante besteht darin, dass man die Auslastung (siehe Formel 3.8) in den Funktionen in folgender Weise abändert:

$$a = \frac{q}{q_{max} \cdot \delta} \quad (3.9)$$

Der Faktor δ verändert die Kapazität und somit den Verlauf der Funktion. Diese Variante wurde durchgeführt und die Ergebnisse sind nicht zufriedenstellend. Die Funktion weicht noch mehr von den Datenpunkten ab. Im Zuge dieser Variante wurde auch die Kapazität geändert, um die Funktion weiter nach rechts zu verlagern, um auch die letzten Datenpunkte abzubilden. Folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieses Versuchs.

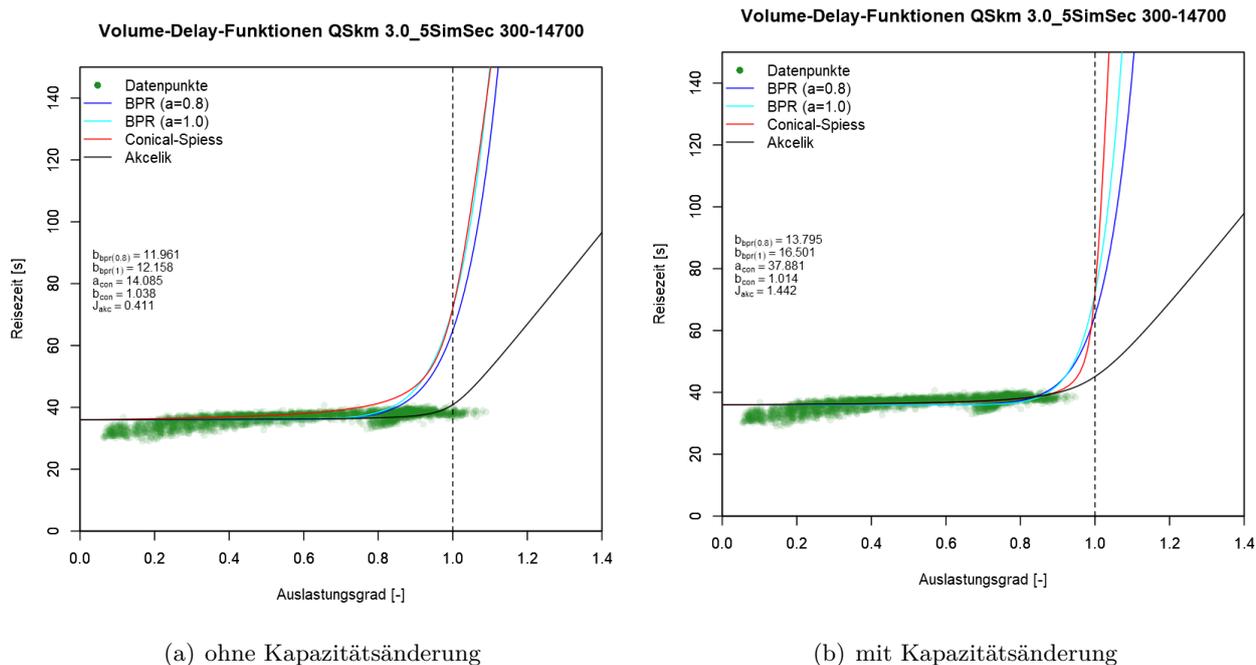


Abbildung 3.16: CR - Funktionen anhand eines 4 - streifigen Querschnittes (SAE 4)

Die Abbildung zeigt, dass das Ergebnis sehr gut aussieht. Dennoch besteht das Problem, dass man mit dem Faktor δ die Kapazität manipuliert hat. Die CR - Funktionen müssen aber auf die in Kapitel 3.2.2 ermittelten Kapazitäten aufbauen, da die Auslastung direkt mit diesem Wert berechnet wird. Somit stimmt der Auslastungsgrad nicht mehr mit den tatsächlichen Werten überein.

Benutzerdefinierte CR - Funktionen

Im Verkehrsmodell gibt es die Möglichkeit eine benutzerdefinierte CR - Funktion zu erstellen und zu verwenden. Es kann hierzu jede Programmiersprache genutzt werden, solange damit eine Windows - dll erstellt werden kann, die über eine Schnittstelle entsprechend der Funktionsdeklarationen von C++ verfügt. Eine weitere Voraussetzung ist es, dass diese Funktion stetig und monoton steigend hinsichtlich der Belastungen sind. Detaillierte Anweisungen, wie genau die Implementierung einer solchen Funktion in VISUM funktioniert, werden im Handbuch gegeben (vgl [13], Seite 1950ff.). Der Nachteil hierbei ist wieder, dass die Funktion monoton steigend sein muss, die Datenpunkte der hochautomatisierten Fahrzeuge aber genau das Gegenteil aufzeigen. Die Möglichkeit eines vernünftigen Ergebnisse ist aber dennoch gegeben, indem man die gleiche Vorgehensweise wie bei Variante 1 durchführt, ohne die Kapazität zu ändern.

Auch in der Literatur wird sich mit diesem Problem eher wenig beschäftigt. Dies ist aber sicherlich ein wichtiger Punkt für die Zukunft der Verkehrsmodellierung, der besprochen und verbessert werden muss. R.Stevens hat eine neue Methode zur Ermittlung von CR - Funktionen vorgestellt. Hierbei

werden beobachtete Datenpunkte, die die Auslastung überschreiten als erforderte Werte deklariert und neu in den Datensatz hinzugefügt. Das heißt, dass Datenpunkte, die sich im gestauten Bereich befinden und somit eigentlich über der Auslastungsgrenze liegen, in den Bereich über der Kapazität transformiert werden (siehe Abbildung 3.17). Dies geschieht mit folgender Formel (vgl. [19]):

$$q_{i,erfordert} = \begin{cases} q_{max} + (q_{max} - q_i) \cdot \frac{v_i}{v_{q_{max}}} & \text{und } v_i \leq v_{q_{max}} \\ q_i, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.10)$$

Mit

$q_{i,erfordert}$ erforderte Verkehrsstärke am Punkt i [Fzg/h]

q_i beobachtete Verkehrsstärke am Punkt i [Fzg/h]

v_i beobachtete Geschwindigkeit am Punkt i [km/h]

q_{max} maximale Verkehrsstärke im beobachteten Zeitraum [Fzg/h]

$v_{q_{max}}$ beobachtete Geschwindigkeit bei maximaler Verkehrsstärke [km/h]

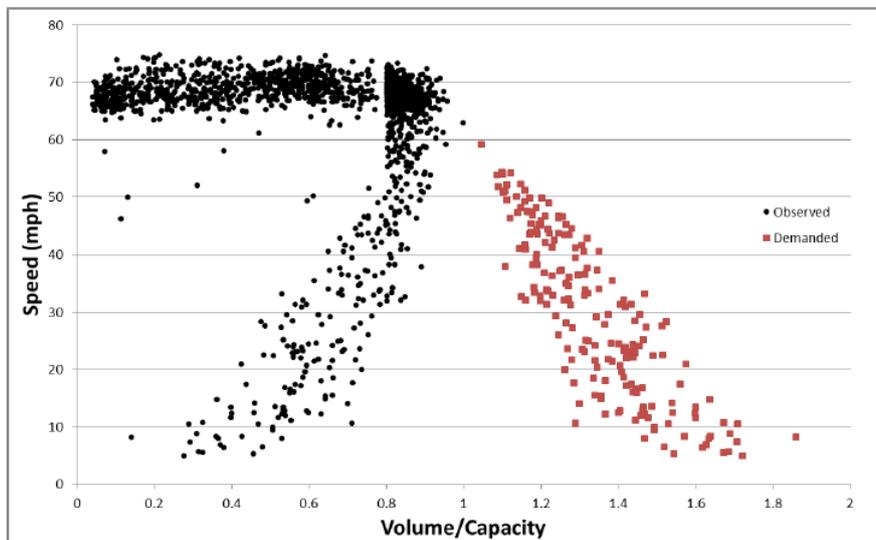


Abbildung 3.17: Erforderte vs. beobachtete Verkehrsstärke/Kapazität Ratio (vgl. [19])

An dieser Abbildung kann mehr sehr gut sehen, dass der gestaute Bereich gespiegelt wurde und sich nun über der Kapazitätsgrenze befindet. Mit dieser Vorgehensweise ist es nun möglich bessere CR - Funktionen in dieses Diagramm zu legen (siehe Abbildung 3.18).

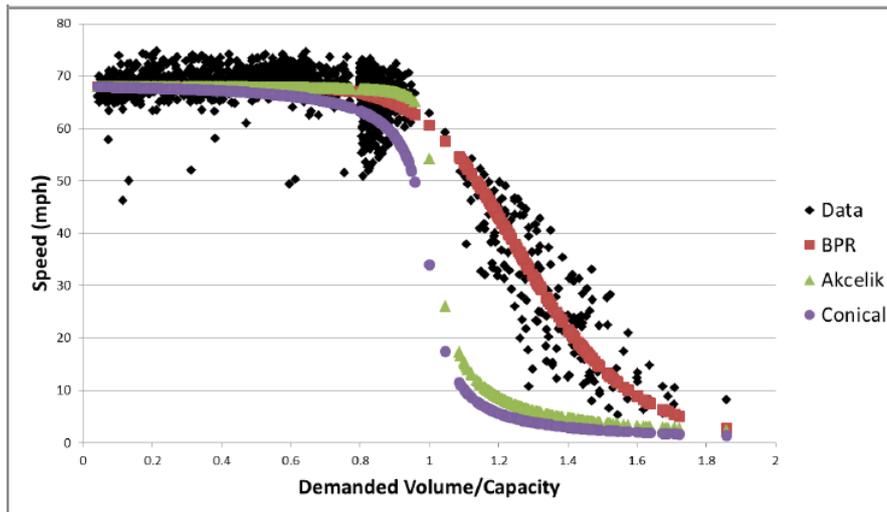


Abbildung 3.18: CR - Funktionen anhand beobachteter und erforderter Datenpunkte (vgl. [19])

Das Problem dieser neue Herangehensweise zur Ermittlung von CR - Funktionen ist, dass man wiederum das hochautomatisierte Fahren nicht abbilden kann, da wieder Datenpunkte im gestauten Bereich vorliegen müssen, damit die Formel 3.10 zum Nutzen kommt. Falls dieser Bereich fehlt, wird nur der zweite Teil der Formel ausgelöst und man hat die gleichen Datenpunkte wie zuvor und man kann die Randbedingungen für den ersten Teil der Formel nicht erfüllen. Da wieder die bekannten Funktionstypen verwendet werden, steht man immer wieder vor dem gleichen Problem. Es müssen komplett neue Typen hierfür erstellt werden, die nicht mehr die monotone Steigung beinhalten. Es ist ein Umdenken in diesem Bereich notwendig um in Zukunft passende Widerstandsfunktionen zu ermitteln und umzusetzen.

4 | Adaptierung des Verkehrsmodells

Für die makroskopische Simulation zum Einfluss von automatisierten Fahrzeugen auf die Leistungsfähigkeit von Autobahnen wurde für dieses Projekt ein Verkehrsmodell der ASFINAG zur Verfügung gestellt. Für die weiteren Modellierungsschritte wird das Programm VISUM der Firma PTV Group verwendet. Bevor man aber mit Analysen und Vorhersagen beginnen kann, muss das Modell auf Richtigkeit überprüft und falls notwendig adaptiert werden. Diese Schritte werden in diesem Kapitel näher beschrieben. Um die Ergebnisse am Ende so genau wie möglich und so nah an den realen Verhältnissen zu bekommen, müssen auch die Eingangsdaten den realen Daten so gut es geht entsprechen. Dies erfordert natürlich den Schritt der Untersuchung des bestehenden Verkehrsmodells auf Ungenauigkeiten oder falschen bzw. fehlenden Daten.

4.1 Untersuchung der Fahrstreifenanzahl

Da die Leistungsfähigkeit des hochrangigen Streckennetzes mehrheitlich von der Kapazität und diese wiederum direkt von der Fahrstreifenanzahl abhängt, ist der erste Schritt die Untersuchung des makroskopischen Netzes in Bezug auf die Fahrstreifenanzahl. Hierfür werden mehrere Hilfsmittel eingesetzt. Zum einen werden Satellitenbilder von Google Maps bzw. Bing Maps von Microsoft betrachtet und ausgewertet. Bei Google Maps ist das Problem, dass die Satellitenbilder teils sehr veraltet sind und man somit nicht die aktuelle Fahrstreifenanzahl beobachten kann. Deshalb wird auch auf die Bilder von Bing Maps zurückgegriffen. Das weitere Hilfsmittel, das aber erst zu einem späteren Zeitpunkt hinzugekommen ist, ist ein GIS - basiertes Modell von der ASFINAG. Dieses Modell wird sehr genau gepflegt und enthält die genaue Anzahl der Fahrstreifen des gesamten A+ S - Netzes Österreichs. Dieses GIS - Netz ist mit den bisherigen Fahrstreifen im VISUM - Modell abgeglichen worden (siehe Abbildung 4.1).

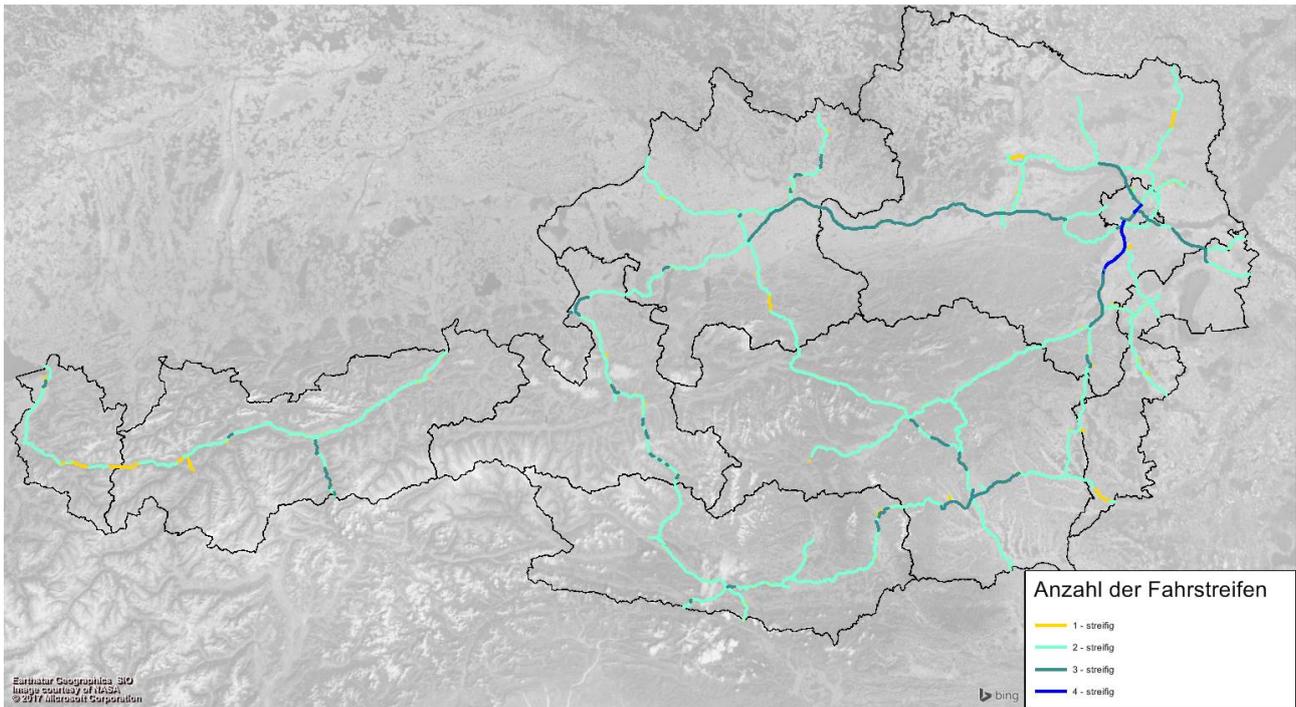


Abbildung 4.1: A+S Netz Österreichs mit der Anzahl der Fahrstreifen

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Zuordnung der freien Strecken in VISUM, nachdem die Änderungen im bestehenden Modell durchgeführt worden sind. Da es für die 1 - streifigen Strecken keine Vergleichswerte gibt, werden diese in der Tabelle nicht berücksichtigt.

			VISUM [Kfz/h]			HBS [Kfz/h]			RVS [Kfz/h]		
Fahrstreifen	Anzahl	Länge [km]	zulässige Höchstgeschwindigkeit [km/h]								
			80	100	130	80	100	130	80	100	130
2 - streifig	7 222	3 528	5 300	5 300	5 000	3 400 - 3 900			3 250 - 3 900		
3 - streifig	1 649	699	7 300	7 000	6 600	4 900 - 5 700			5 200 - 5 900		
4 - streifig	189	50	10 000	9 500	9 000	6 700 - 7 800			7 200 - 7 850		
Summe	9 060	4 277									

Tabelle 4.1: Anzahl, Länge und Kapazitätswerte in VISUM mit Vergleich anderer Richtlinien

Die Tabelle soll auch den Unterschied der Kapazitäten im Makronetz und denen der Richtlinien aufzeigen. Im Modell sind alle Strecken einem gewissen Typ mit einer eingespeicherten Kapazität zugeordnet. Die Kapazität einer Richtungsfahrbahn ist im HBS abhängig von der Fahrstreifenanzahl, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der Längsneigung, dem Schwerverkehrsanteil und der Lage der

Autobahn. Wie die Kapazität in der RVS zustande kommt, ist in Kapitel 3.2.1 erklärt worden.

4.2 Ausbau und Erweiterungen

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Analysejahr 2025. Deshalb müssen als nächster Schritt die bestehenden bzw. zukünftigen Ausbauten/Netzerweiterungen berücksichtigt werden. Das Basisnetz enthält zwar die Strecken, die bis 2025 fertiggestellt werden, aber neben dem Fehlen der Anschlussstellen, sind auch die Verläufe dieser Strecken sehr ungenau eingezeichnet. Hierfür wird die Homepage der ASFINAG (siehe [20]) zu Hilfe genommen. Hier kann man die zukünftigen Verläufe der neuen Strecken in einem Video oder in einem *.pdf - File betrachten. In der folgenden Abbildung kann man exemplarisch den neuen Verlauf der S1 Wiener Außenring Schnellstraße zwischen Schwechat und Süßenbrunn sehen. Bei der Abbildung handelt es sich um den Verlauf der nach der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) festgelegt wurde.

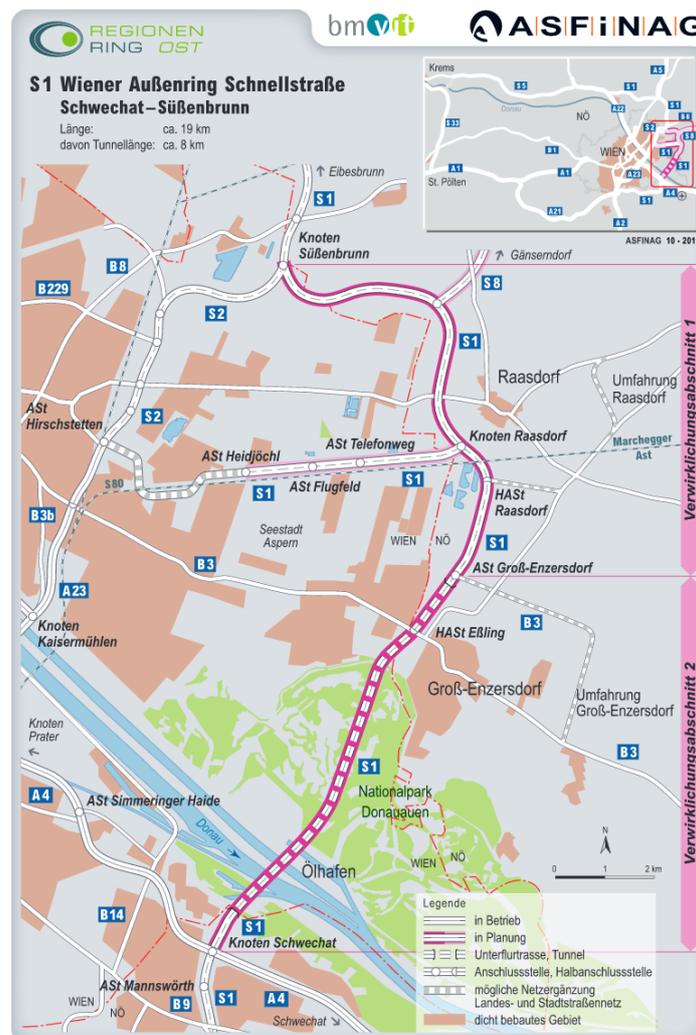


Abbildung 4.2: Streckenverlauf der S1 nach UVE

Man bekommt aber keine Informationen über die Freifahrtgeschwindigkeit oder auch der Fahrstreifenanzahl. Mit Rücksprache mit der ASFINAG konnten aber auch diese Informationen beschaffen werden. In der folgenden Tabelle sieht man die Anzahl der Strecken, die bearbeitet werden mussten. In Abbildung 4.3 sieht man die Grafik zur Tabelle.

Art der Änderung	Anzahl	Summe der Strecken vor/nach Änderungen
Neubau	683	15 938/16 621
Fahrstreifenerhöhungen	728	
Fahrstreifenreduktionen	1014	

Tabelle 4.2: Auflistung der Änderungen

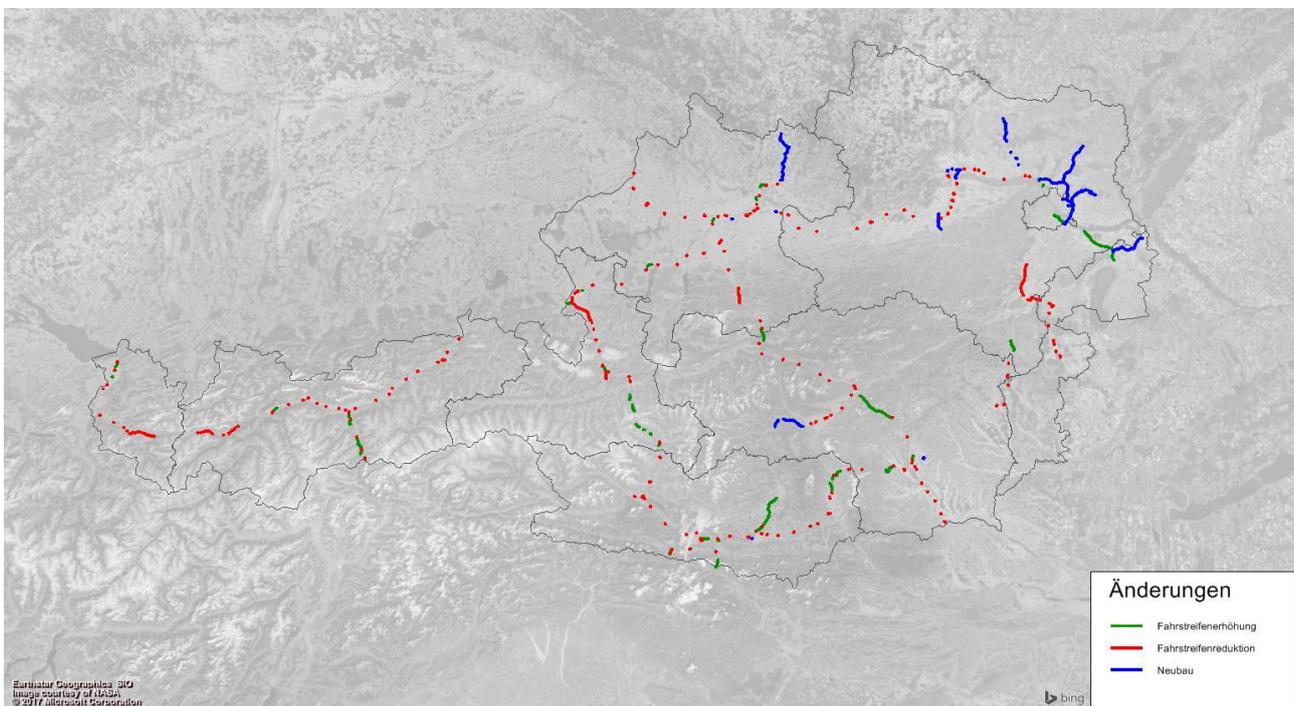


Abbildung 4.3: Änderungen im Verkehrsmodell

4.3 Einfügen typischer Netzelemente

Wie schon in Kapitel 3.2.2 erklärt, werden verschiedene Netzelemente in der Mikrosimulation modelliert und simuliert. Deshalb müssen diese Netzelemente auch im makroskopischen Modell sichtbar dargestellt werden. In Abbildung 3.11 kann man die ausgesuchten Netzelemente sehen. Diese müssen somit auch im makroskopischen Modell zu finden sein. Wie schon erwähnt, gibt es auf dem A + S Netz in Österreich auch noch andere Typen von Anschlussstellen. Die gesamte Liste der typischen Netzelemente, die auch im makroskopischen Modell abgebildet sind, werden in der folgenden Tabelle aufgezeigt.

Netzelement	Anzahl	Häufigkeit	Länge [km]
freie Strecken			
1 - streifig	3410	20,5%	600
2 - streifig	7222	43,5%	3528
3 - streifig	1649	9,9%	699
4 - streifig	189	1,1%	50
Einfahrten			
1+1RE	23	0,1%	5
2+1RE	1 340	8,0%	293
2+2RE	262	1,6%	54
3+1RE	335	2,0%	77
3+2RE	76	0,5%	17
4+1RE	42	0,3%	8
4+2RE	17	0,1%	5
Ausfahrten			
1 - 1RA	47	0,3%	9
2 - 1RA	2 284	13,7%	433
2 - 2RA	58	0,3%	10
3 - 1RA	374	2,3%	73
3 - 2RA	54	0,3%	10
4 - 1RA	41	0,2%	7
4 - 2RA	18	0,1%	4

Tabelle 4.3: Anzahl, Häufigkeit und Länge der Netzelemente im Streckennetz Österreichs

Wie man an dieser Tabelle sehen kann, werden für die Simulation im mikroskopischen Modell die häufigst vorkommenden Netzelemente verwendet. Bei den 1 - streifigen Elementen sind auch die Rampen der einzelnen Anschlussstellen berücksichtigt worden und deshalb fällt die Häufigkeit sehr hoch aus. Da die Rampen aber für die Simulationen nicht wichtig sind, werden die 1- streifigen Elemente nicht weiter betrachtet.

Die freien Strecken sind mit der Überprüfung der Fahrstreifenanzahl modelliert worden. Die einzelnen Ein - bzw. Ausfahrten sind wie folgt ins makroskopische Modell eingegeben worden. Die Knotentypen (z.B.: 2+1RE) sind nach der Anzahl der Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn und der Rampen differenziert. Somit kann relativ einfach die Zuordnung der Netzelemente zu den Strecken geschehen. Bei den Knotentypen gibt es noch einen weiteren wichtigen Faktor, der berücksichtigt werden muss. Es gibt zwei verschiedene Messquerschnitte an den Knotenpunkten (Beginn und Ende Verflechtung), die auch unterschiedliche Kapazitäten aufweisen. Um dies auch im Makronetz zu berücksichtigen werden jeweils 200 m vor und nach der Anschlussstelle mit dem gleichen Netzelement attribuiert. Dieser Wert ist die nach RVS gültigen Längen von Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsstreifen auf Autobahnen. Deshalb werden auch im Modell die angrenzenden Kanten (Strecken) an einem Knoten mit ungefähr 200 m Länge gehalten. Den Vergleich kann man in den beiden nächsten Abbildungen sehen. Hier wird exemplarisch der Knoten Wiener Neustadt - West dargestellt. Wie die Querschnitte der einzelnen Simulationsstrecken aussehen, kann man im Kapitel 5.1 sehen.

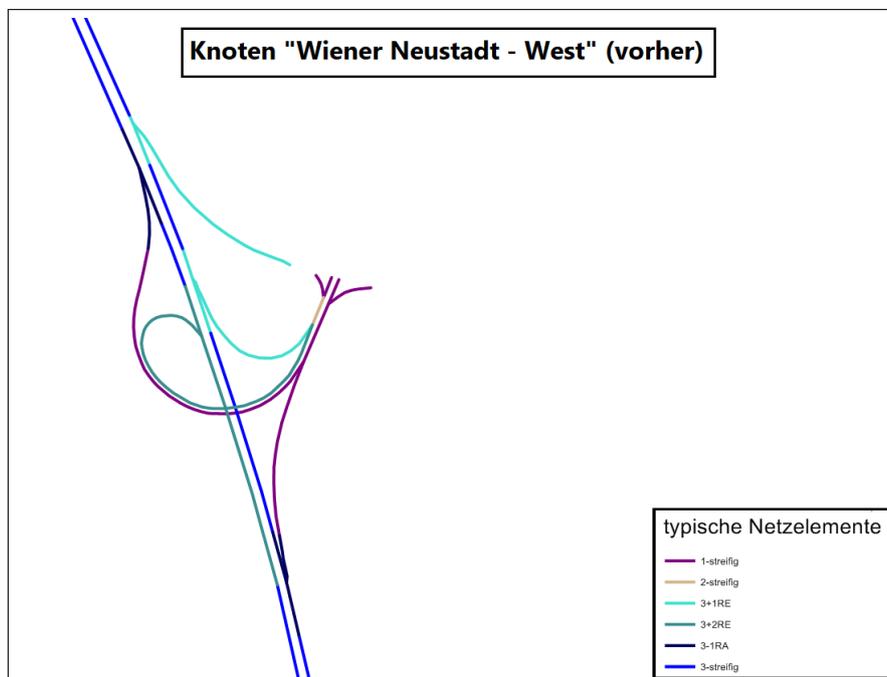


Abbildung 4.4: Modellierung Knoten Wiener Neustadt vorher

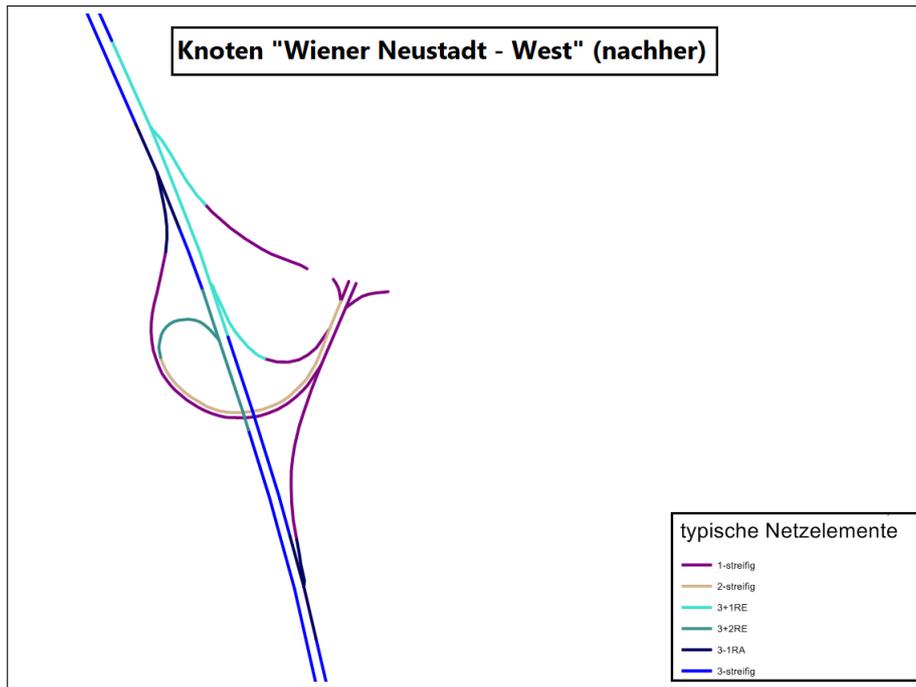


Abbildung 4.5: Modellierung Knoten Wiener Neustadt nachher

Die Abbildung 4.6 zeigt die Klassifikation der einzelnen Netzelemente im Netz.

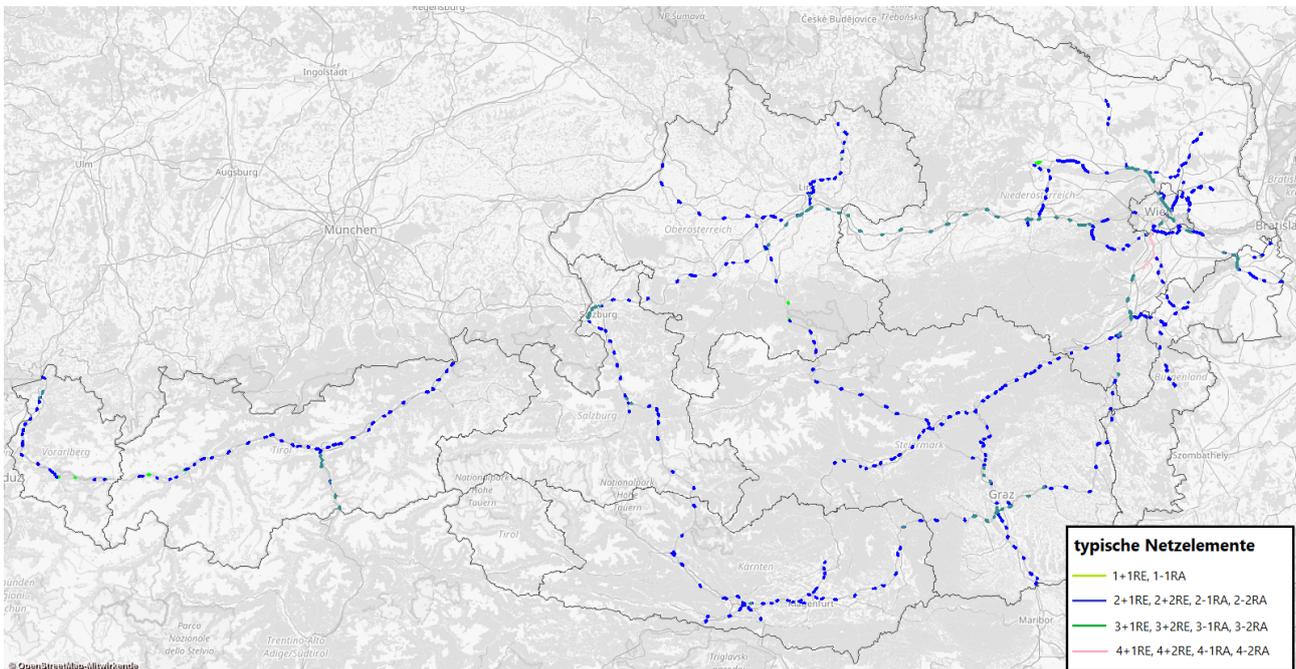


Abbildung 4.6: Zuordnungen der Netzelemente im Streckennetz Österreichs

4.4 Belastungsverhältnisse

Da man verschiedene Kapazitäten für die einzelnen Belastungsverhältnisse (G - Stufen) errechnet, muss auch im makroskopischen Modell nach den Belastungsverhältnissen differenziert werden. In Abbildung 4.7 kann man die Einteilung der Anschlussstellen des österreichischen A+S - Netzes in die Belastungsverhältnisse sehen.

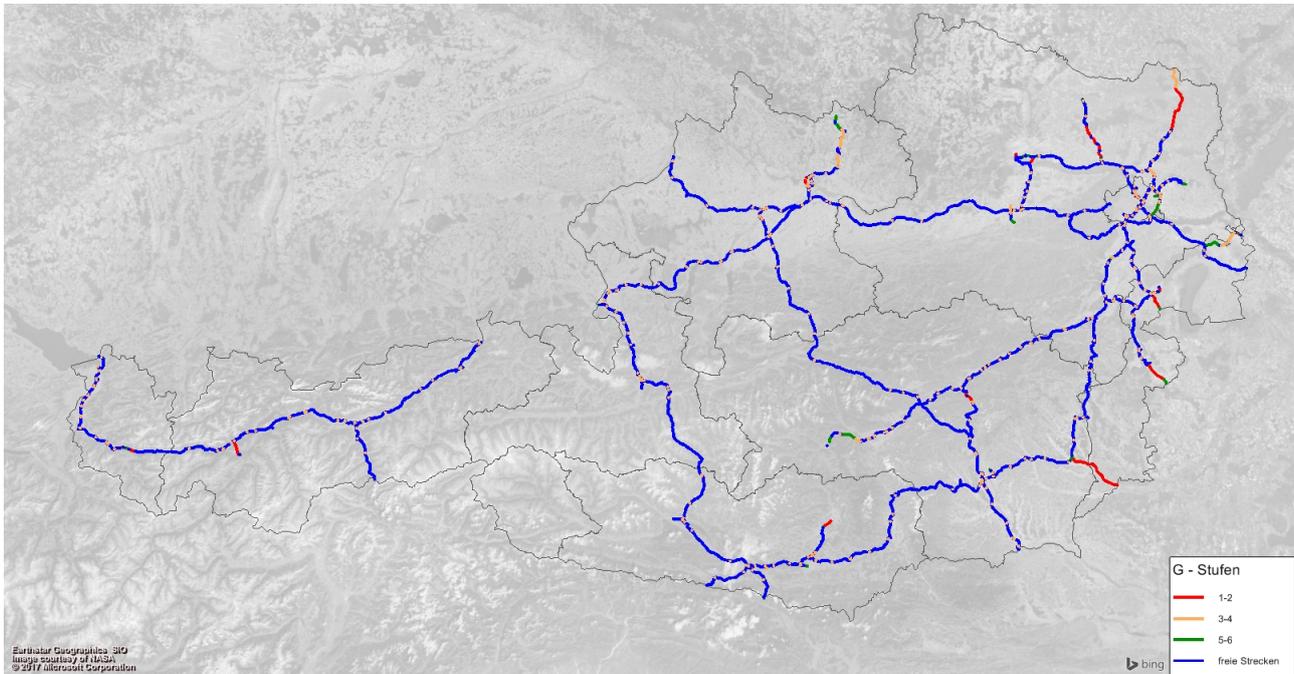


Abbildung 4.7: Einteilung des A+S Netzes in die G - Stufen

Durch die Filterung der Strecken nach den Belastungsverhältnissen ist es sehr einfach die einzelnen Anschlussstellen mit den jeweiligen Belastungsverhältnissen zu attributieren. Zur besseren Visualisierung hat man noch die freien Strecken hinzugefügt, die aber keine G - Stufen repräsentieren.

4.5 SV - Anteil

Auch der SV - Anteil spielt eine wichtige Rolle in der Kapazitätsermittlung und muss deshalb im Netz zu finden sein. Auf dem A+S Netz in Österreich sind aber verschiedenste Anteile des Schwerverkehrs anzutreffen. Die Simulationen aber werden nur nach drei Anteilen eingestuft. Deshalb wird folgende Vorgehensweise durchgeführt. Für den ersten Schritt ist es notwendig die Anteile auf den einzelnen Strecken zu berechnen. Hierfür wird folgende Formel herangezogen:

$$SV - Anteil = \frac{qLKW}{q} \quad (4.1)$$

Nun kann man die Strecken im Netz nach diesen Werten filtern. Alle Strecken, die einen Anteil $< 5\%$ aufweisen werden dem 5% - igen Anteil zugeordnet. Falls die Werte zwischen 5% und 10% liegen, werden diese Strecken mit 10% SV - Anteil attribuiert. Schlussendlich bleiben dann noch die Strecken mit einem Anteil von $> 15\%$ und diese werden dem letzten simulierten SV - Anteil zugeschrieben (15%). Abbildung 4.8 veranschaulicht die verschiedenen Anteile des gesamten hochrangigen Streckennetzes Österreichs.

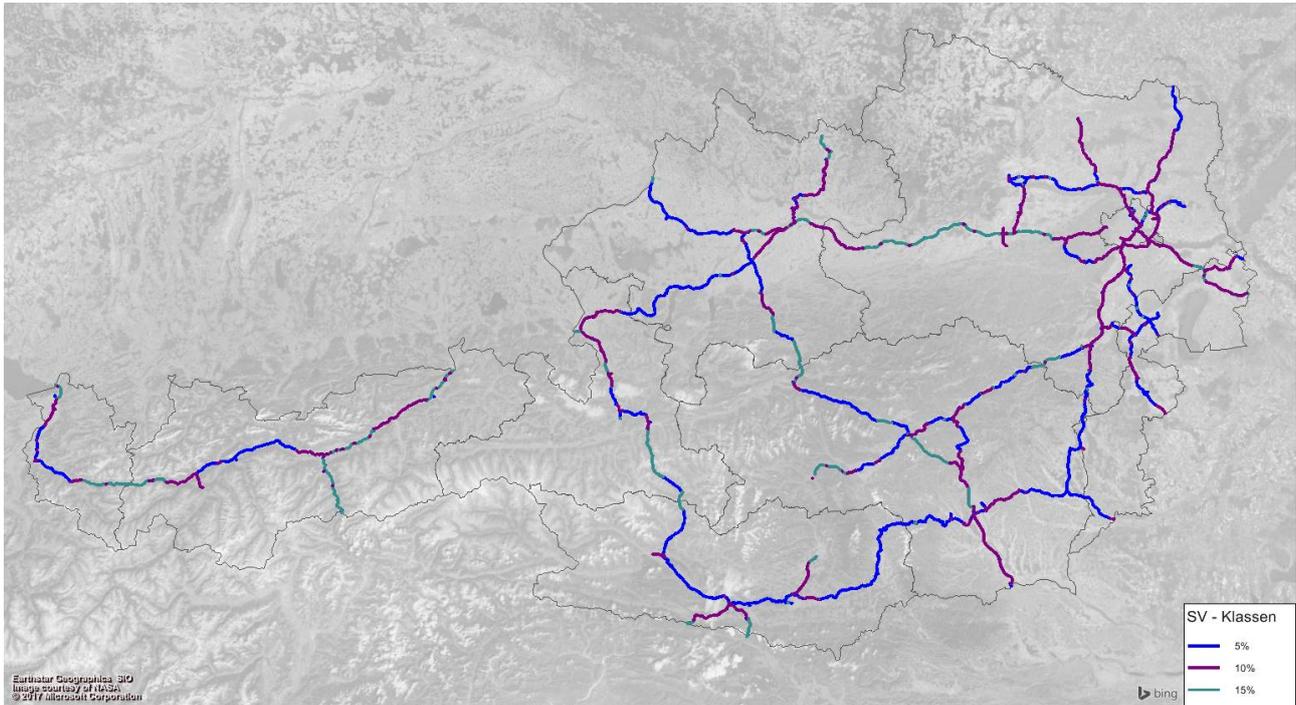


Abbildung 4.8: SV - Anteile auf dem A+S Netzes Österreichs

4.6 CR - Funktionen

Der nächste Schritt ist, das Netz so vorzubereiten, dass man für die CR - Funktionen nur noch die geschätzten bzw. berechneten Funktionsparameter eingeben muss. Die CR - Funktionen sind im Verkehrsmodell den einzelnen eingespeicherten Streckentypen (1 - streifig, 2 - streifig,...) zugeordnet. Im Netz unterscheiden sich diese Streckentypen nur nach der Anzahl der Fahrstreifen und der Freifahrtsgeschwindigkeit. Deshalb, wie schon in Kapitel 3.3 erklärt, sind nur noch die freien Strecken zu betrachten. Die Zuordnung der Funktionen zu einem jeweiligen Typen geschieht im Modell per Matrix (siehe Abbildung 4.9). Die Tabelle mit den verschiedenen Streckentypen ist im Anhang zu finden (siehe Tabelle 6.1). Hier sind noch eigene Typen eingebracht worden, um die einzelnen Cluster auch noch zu berücksichtigen. Der Grund dahinter wird später in diesem Kapitel näher erläutert.

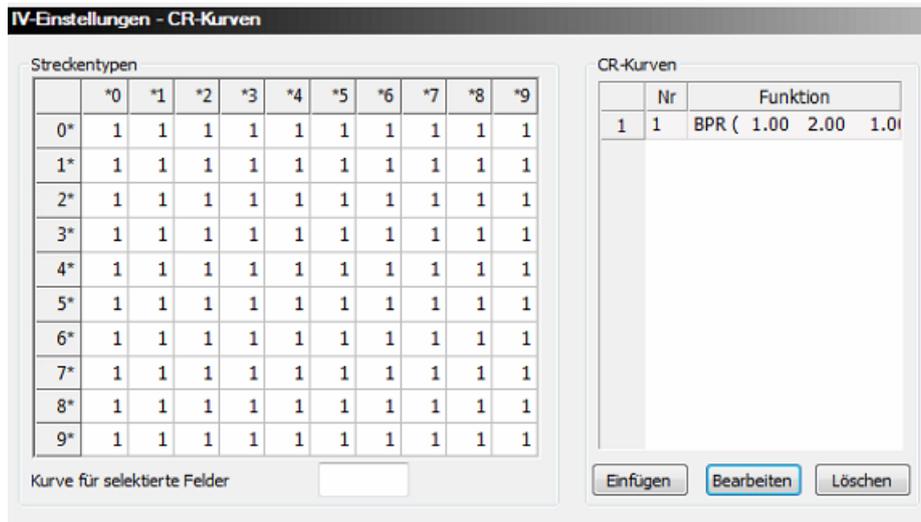


Abbildung 4.9: Matrix für die CR - Funktionen in VISUM

Wie man sehen kann, handelt es sich hierbei um eine 10x10 - Matrix und somit werden 100 verschiedene Streckentypen unterstützt. Auf der rechten Seite kann man die verschiedensten Funktionen einfügen und bearbeiten. Hier ist nur exemplarisch eine BPR - Funktion mit den Parameterwerten von $\alpha = 1$, $\beta = 2$ und $\gamma = 1$ eingespeichert. Dies sind die Defaultwerte, wenn man in VISUM ein neues Projekt startet.

4.7 Ermittlung des γ Wertes

In diesem Unterkapitel geht es darum, den γ - Wert, der in VISUM für die CR - Funktionen verwendet wird, zu ermitteln. Der Wert sorgt dafür, dass die Widerstandsfunktion auf den Stundenwert skaliert wird. Wenn zum Beispiel die Einheit der Werte der Nachfragematrizen und die der Kapazität schon übereinstimmen (Fzg/h), dann wäre γ gleich 1. Die Kapazität, die auf den einzelnen Strecken eingespeichert ist, sind immer in Stundenwerten und deshalb ist es wichtig zu wissen, ob die Nachfragematrizen auch diese Einheit aufweisen. In dieser Arbeit wurde das Modell mit den Nachfragewerten von der ASFINAG zur Verfügung gestellt und es handelt sich hierbei um Tageswerte, das heißt, dass die Matrix in Fzg/d vorliegt. Die resultierende Belastung, die nach der Umlegung auf den einzelnen Strecken vorzufinden ist, wird deshalb auch die Tageseinheit vorweisen. Um einen Auslastungsgrad zu berechnen (siehe Formel 3.8), der ein wichtiger Faktor für die CR - Funktionen bildet, ist es notwendig, dass die beiden Attribute (Belastung und Kapazität) in der gleichen Einheit vorliegen. Mit dem γ - Wert berücksichtigt man dies in den einzelnen Funktionen. Für die Darstellung des Auslastungsgrades im Makronetz muss noch ein weiterer Schritt durchgeführt werden. Die Vorgehensweise wird im Folgenden erklärt.

Die Belastung jeder Strecke über den Tag kann über eine sogenannte Gangline beschrieben werden

und stellt den Verlauf der Verkehrsbelastung über den Tag grafisch dar. Für die Schaffung von typischen Tagesganglinien wurden Realdaten vieler Messquerschnitte von der ASFINAG im Projekt zur Verfügung gestellt. Mithilfe einer Clusteranalyse wurden im Projekt VEGAS drei mittlere Ganglinien über alle Querschnitte ermittelt. In der folgenden Abbildung wird exemplarisch eine Ganglinie von mehreren Querschnitten der A2 in Fahrtrichtung Lassnitzhöhe gezeigt.

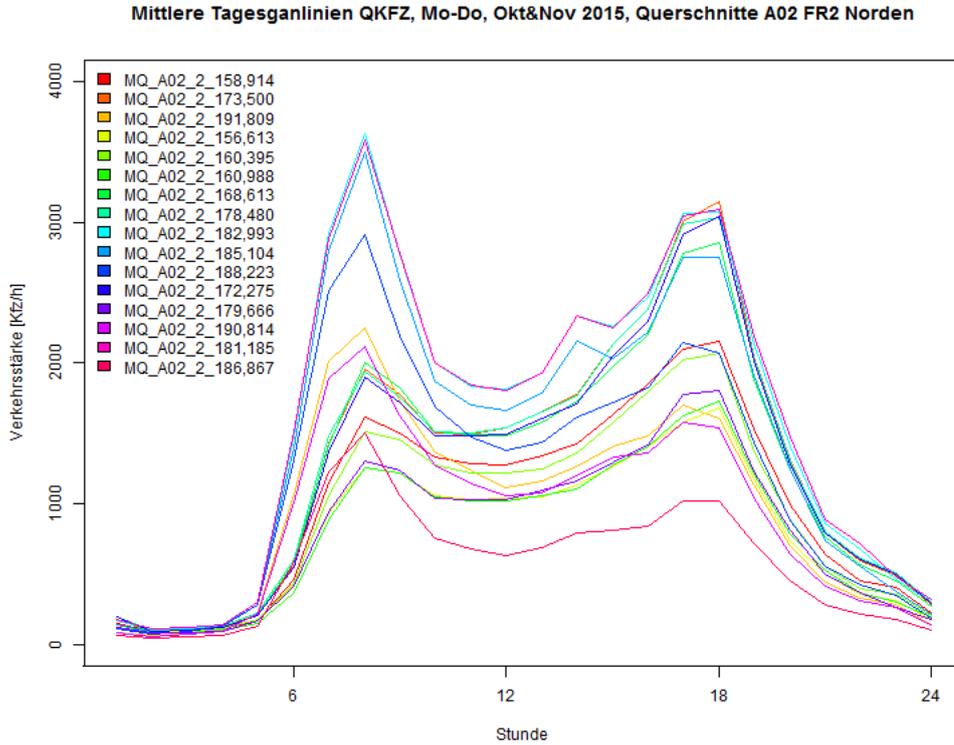


Abbildung 4.10: Ganglinie mehrerer Querschnitte der A2 von Graz in Fahrtrichtung Lassnitzhöhe (absolute Werte)

Auch der Tageswert auf den einzelnen Querschnitten ist gegeben und man kann mithilfe der Ganglinien als nächsten Schritt für jede Stunde den relativen Anteil mit folgender Formel ermitteln:

$$q_{rel} = \frac{q_{Stunde}}{q_{Tag}} \quad (4.2)$$

Mit diesen Werten bekommt man neue Ganglinien, die die relativen Anteile der einzelnen Stunden abbildet. Folgende Abbildung zeigt die gleichen Querschnitte der A2 mit den relativen Anteilen.

Mittlere Tagesganlinien QKFZ, Mo-Do, Okt&Nov 2015, Querschnitte A02 FR2 Norden

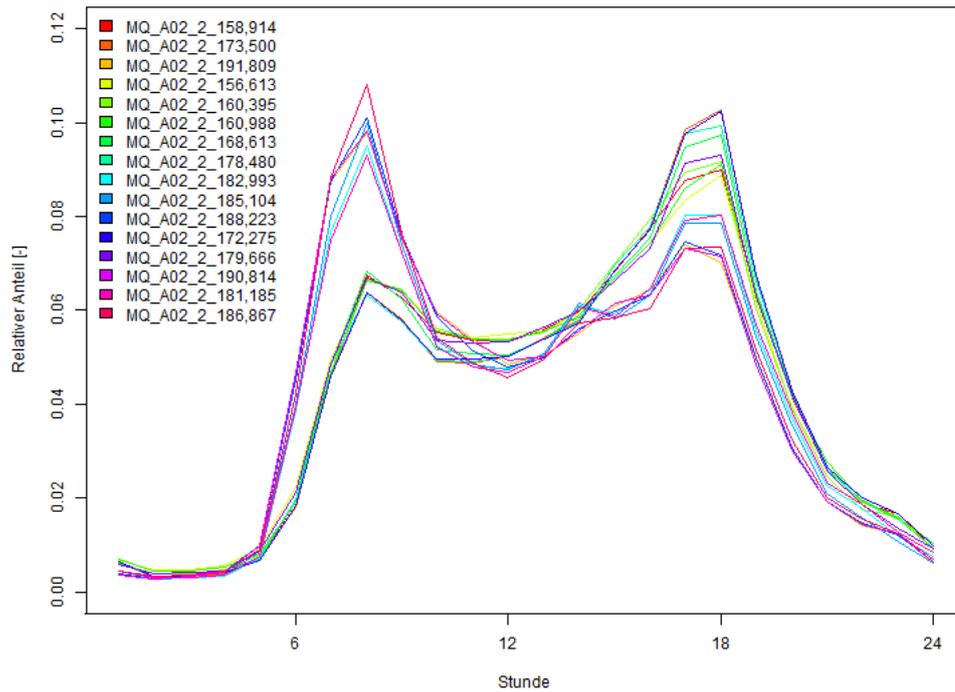


Abbildung 4.11: Ganglinie mehrerer Querschnitte der A2 von Graz in Fahrtrichtung Lassnitzhöhe (relative Werte)

Für die Clusteranalyse, die hier noch erklärt wird, sind noch mehrere Querschnitte von anderen Autobahnen notwendig, da man das gesamte A+S Österreichs abbilden möchte.

Die Clusteranalyse ist ein Werkzeug zur Identifizierung und Bildung von Gruppen aus umfangreichen Daten mit einer hohen Anzahl an Objekten (hier: Tagesganlinien). Diese Gruppenbildung geschieht unter Berücksichtigung von verschiedenen Merkmalen (hier: Tageszeit in Stunden). Das Ziel ist es, dass sich die Gruppen untereinander stark und die Daten innerhalb nur schwach unterscheiden (vgl. [22]). Es gibt mehrere Verfahren, wie eine solche Analyse durchgeführt werden kann. Eine Übersicht der verschiedenen Verfahren wird in Abbildung 4.12 veranschaulicht.

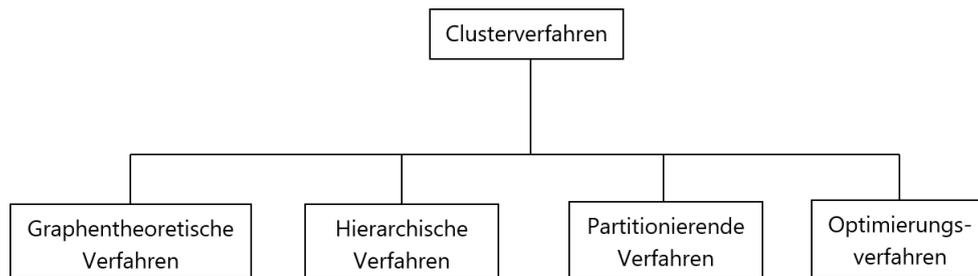


Abbildung 4.12: Überblick der Verfahren für eine Clusteranalyse

In der Regel gibt es drei Ablaufschritte, die eine Clusteranalyse bestimmt (vgl. [21]):

- Bestimmung der Ähnlichkeit
- Auswahl des Fusionierungsalgorithmus
- Bestimmung der Clusterzahl

Der Unterschied zwischen den hierarchischen und partitionierenden Verfahren ist es, dass man bei den partitionierenden die Clusteranzahl vorher bestimmt und die hierarchischen diese durch schrittweises Zusammenfügen von Objekten. Dadurch entstehen beim zweiten Verfahren immer Baumstrukturen, die durch Dendogramme visualisiert werden. Die weiteren Ergebnisse basieren auf das erste Verfahren. Hier können zwei verschiedene Algorithmen eingesetzt werden: K - means und k - medoid. Sehr häufig wird das k -means - Verfahren mit einer vordefinierten Anzahl k an Clustern verwendet. Bei diesem Algorithmus steht die Minimierung der Abstandsquadrate innerhalb einer Gruppe und die Maximierung der Gruppen im Vordergrund. Im Gegensatz dazu wird beim k -medoid - Verfahren ein Element der Gruppe als Repräsentant verwendet und die Abstände von diesem Mittelwert zu allen anderen Gruppenelementen bestimmt (vgl. [22]). Diese Vorgehensweise ist somit sehr robust gegenüber Ausreißern und auch deshalb wird dieser Algorithmus für die Clusteranalyse verwendet. Um auf eine optimale Clusteranzahl zu kommen, kann die Silhouette - Statistik herangezogen werden. Ausgehend von einer Unähnlichkeit zweier Punkte wird beurteilt, wie gut ein Datenpunkt in einen Cluster passt. Diese Statistik dient zur Beurteilung der Anzahl zu wählender Cluster (vgl. [22]). Folgende Abbildung zeigt die endgültige Clustereinteilung anhand der Querschnittsdaten von mehreren Autobahnabschnitten in Österreich.

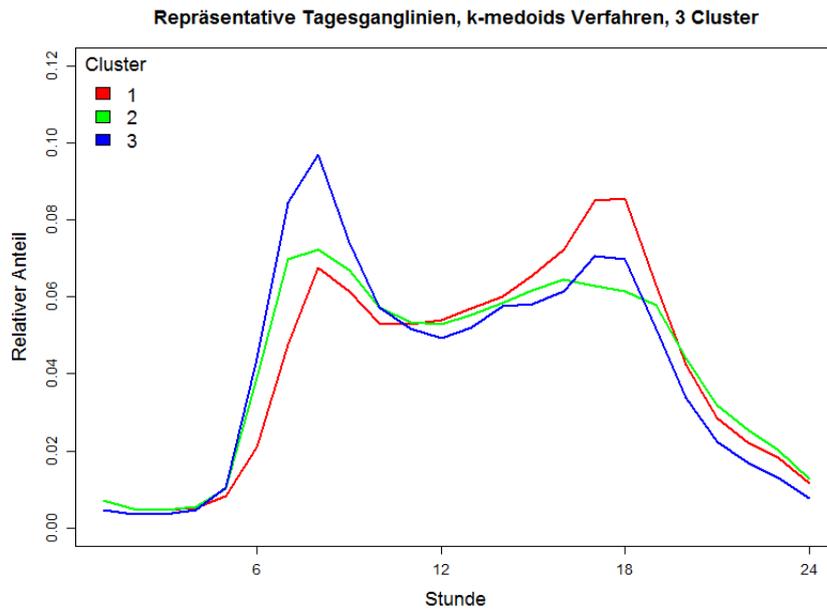


Abbildung 4.13: Clustereinteilung für A + S Netz Österreich

Die Ergebnisse der Clusteranalyse wurden mit der Lage der Messquerschnitte, die hierfür verwendet wurden, verglichen. Daraus resultiert, dass es sich hierbei um die Cluster 1 (stadtauswärts), Cluster 2 (tangential, innerhalb von Städten) und Cluster 3 (stadteinwärts) handelt. Da die zur Verfügung gestellten Daten nicht alle Regionen in Österreich abdecken, muss noch ein vierter Cluster eingefügt werden. Dieser fungiert als Mittelwert über die anderen drei und wird als rural bzw. außerhalb von Ballungsräumen gehalten. Diese Ganglinie wird in der folgenden Abbildung gezeigt.

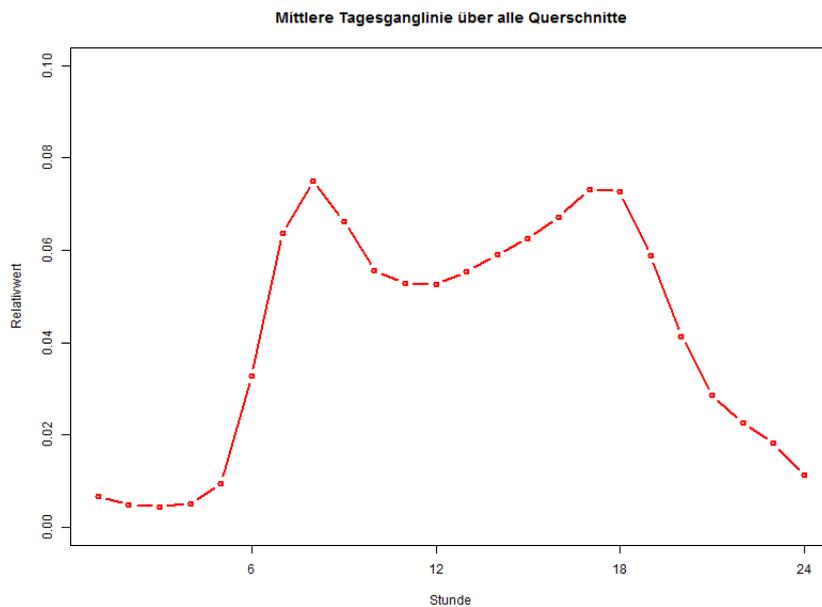


Abbildung 4.14: mittlerer Cluster 4 für das Verkehrsmodell

Letztendlich ist es als letzten Schritt wichtig, diese Cluster auf das hochrangige Streckennetz Österreichs zu transformieren. Hierbei wurde genauestens mit der ASFINAG abgesprochen, welche Strecken oder Regionen den einzelnen Clustern zugehörig ist. Man kann das Ergebnis der Clustereinteilung des A+S - Netzes in der folgenden Abbildung 4.15 sehen.

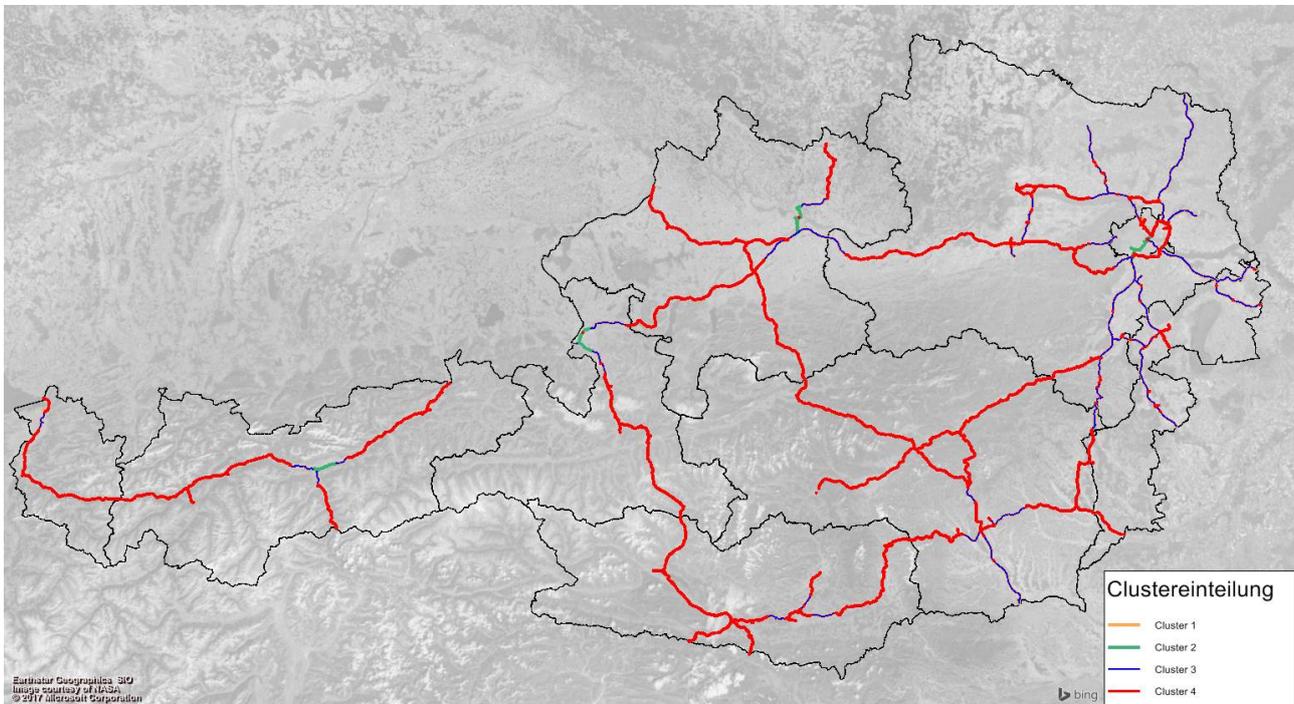


Abbildung 4.15: Clustereinteilung des Straßennetzes in Österreich

Diese Abbildung zeigt, dass Cluster 4 sehr dominant ist, da sehr viele Strecken im ruralen Gebiet oder außerhalb von Ballungsräumen zu finden sind.

Durch die Kenntnisse der relativen Tagesganglinien kann man nun die Anteile jeder einzelnen Stunde ablesen. Mit diesen Werten muss die Tagesbelastung im Netz abgemindert werden, um die jeweilige Stundenbelastung zu erhalten. In der folgenden Tabelle sind ausgewählte Stundenwerte der einzelnen Cluster zu finden.

	07:00	12:00	17:00	21:00
Cluster 1	6,8%	5,7%	8,6%	2,2%
Cluster 2	7,2%	5,6%	6,1%	2,6%
Cluster 3	9,7%	5,2%	7,0%	1,7%
Cluster 4	7,5%	5,5%	7,3%	2,3%

Tabelle 4.4: Prozentualen Anteile ausgewählter Stundenwerte auf den gesamten Tag

Die hier angeführten Stunden werden auch im Makronetz simuliert. Hierbei handelt es sich um die

Morgen- und Abendspitze (07:00 Uhr bis 08:00 - 17:00 Uhr - 18:00 Uhr). Die beiden anderen Stunden präsentieren die Mittagszeit (12:00 Uhr - 13:00 Uhr) und eine spätere Abendstunde (21:00 Uhr - 22:00 Uhr), um die Auswirkung des hochautomatisierten Fahrens nicht nur in den Spitzenstunden zu ermitteln.

Der γ - Wert, der nicht die Belastung abmindert sondern die Kapazität in der CR - Funktion erhöhen soll (siehe Formel 2.4), wird als Reziprokwert dieser relativen Stundenwerte geführt und wird mit folgender Formel berechnet. Exemplarisch wird hier mit dem Spitzenstundenwert des Clusters 1 gerechnet.

$$\gamma = \frac{1}{0,097}$$
$$\gamma \approx 10,3$$

4.8 Makroskopische Kenngrößen

Eine Kenngröße ist ein dem Verkehrsmodell entnommener Messwert. Diese dienen allgemein zur Messung von Eigenschaften von Verkehrsmodellen. Es gibt im Verkehrsmodell zwei Typen von Kenngrößen:

- Relations- und Nachfragesegment- bezogene Kenngrößen
- Globale Kennzahlen

Der erste Typ an Messwerten liegen in Matrizen vor und werden nur auf Anforderung berechnet. Hierbei geht es um Eigenschaften jeder Relation zwischen Quellbezirk i und Zielbezirk j (zum Beispiel die Fahrzeit im Fahrzeug). Globale Kennzahlen, die auch für diese Arbeit vordergründig betrachtet werden, werden vom Modell bei jeder Umlegung berechnet. Anders als bei den Kenngrößenmatrizen handelt es sich hier um Eigenschaften des gesamten Umlegungsergebnisses, also des Verkehrsmodells selbst. Die globalen Kennzahlen werden über Listen ausgegeben. Typische Kennzahlen sind im Folgenden aufgezählt und werden auch in dieser Arbeit als Vergleichsgrößen hergenommen, um den Unterschied zu automatisierten Fahrzeugen aufzuzeigen.

- mittlere Reisezeit im Netz
- Summe Fahrzeugkilometer

Eine weitere wichtige Kenngröße, die aber nicht automatisch berechnet wird, ist der Auslastungsgrad. Um die Auswirkung von automatisierten Fahrzeugen auf die Leistungsfähigkeit vom hochrangigen Straßennetz zu erfassen, wird eine Kapazitätsbewertung bzw. LOS - Bewertung durchgeführt. LOS

(Level of Service) ist in sechs Stufen eingeteilt und jede dieser Stufen beschreibt die Verkehrsqualität auf Straßen. Die Definition der Qualitätsstufen ist u.a. im HBS beschrieben. Die Stufen A - F beziehen sich auf das Verhältnis von Verkehrsstärke und der Kapazität. Der sogenannte Auslastungsgrad oder Belastungsquotient ist der entscheidende Faktor für jede LOS - Stufe und wird mit folgender Formel berechnet:

$$a = \frac{Q_B}{C} \quad (4.3)$$

Q_B ist hierbei die Verkehrsstärke in Kfz/h und bei C handelt es sich um die Kapazität des jeweiligen Streckenabschnittes in Kfz/h. Die Verkehrsstärke ist die Belastung, die nach der gerechneten Umlegung des Programms auf den Strecken herrscht. In der folgenden Tabelle sieht man die einzelnen LOS - Stufen mit deren Eigenschaften aufgelistet.

Qualitätsstufen	Auslastungsgrad a [-]	Verkehrsfluss
LOS A	$\leq 0,3$	frei
LOS B	$0,3 < a \leq 0,55$	frei
LOS C	$0,55 < a \leq 0,75$	stabil
LOS D	$0,75 < a \leq 0,9$	stabil (gebundener Verkehr)
LOS E	$0,9 < a \leq 1$	stabil/instabil (zäh fließender Verkehr)
LOS F	> 1	instabil (Stau)

Tabelle 4.5: LOS - Stufen

Diese Einteilung kommt aus der HBS (vgl. [18]) und ist ausschlaggebend zur Beurteilung der Verkehrsqualität auf Straßenabschnitten.

5 | Ergebnisse

5.1 Kapazität für typische Streckenabschnitte

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung der Kapazitätsermittlungen für die typischen Netzelemente, die in Abbildung 3.11 zu sehen sind. Bevor aber diese Ergebnisse präsentiert werden, wird der Aufbau der Strecken und die Lage der Querschnitte in den mikroskopischen Simulationen gezeigt.

5.1.1 Lage der Auswertequerschnitte

Für die Auswertung der Daten benötigt man Querschnittsdaten. Um diese zu generieren, müssen auf den simulierten Strecken Detektoren eingefügt werden. In Abbildung 5.1 sieht man die angebrachten Querschnitte für die freien Strecken. Hier nur exemplarisch für einen 2 - streifigen Streckenabschnitt.

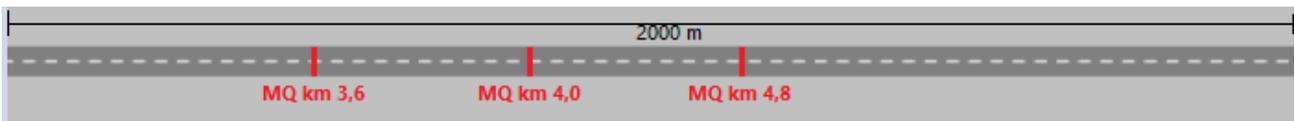


Abbildung 5.1: Aufbau eines 2 - streifigen Streckenabschnittes in der Mikrosimulation

Diese drei Querschnitte werden einzeln nach der Vorgehensweise ausgewertet, die in Kapitel 3.2.2 besprochen wurde. Da man aber pro Strecke und Streckentyp nur eine Kapazität haben möchte, werden bei den freien Strecken die drei erhaltenen Werte für die Querschnitte gemittelt. Die Lage der Querschnitte für 3 - streifige und 4 - streifige Streckenabschnitte ist gleich und deshalb gibt es hierfür keine eigenen Abbildungen.

Für die Ein - bzw. Ausfahrten gibt es jeweils zwei Querschnitte, die eingefügt und ausgewertet werden (siehe Abbildungen 5.2 und 5.3). Da man diese zwei Querschnitte im Makronetz berücksichtigt hat, muss man hier keinen Mittelwert berechnen (siehe Kapitel 4.3). Folgende Abbildungen zeigen exemplarische Beispiele einer Einfahrt und Ausfahrt anhand des Netzelementes 2+1RE und 2 - 1RA.



Abbildung 5.2: Aufbau des typischen Netzelementes 2+1RE



Abbildung 5.3: Aufbau des typischen Netzelementes 2-1RA

Wie man an dieser Abbildung sehen kann, sind mehrere Querschnittsdetektoren auf dieser Strecke eingefügt worden. Für die Ergebnisse dieser Arbeit sind nur die am Beginn und am Ende der Verflechtung wichtig, da man an diesen Netzelementen die größte Wirkung des hochautomatisierten Fahrzeugs erkennen kann.

5.1.2 Ergebnisse der Kapazitätsermittlung für freie Strecken

In den Tabelle im Anhang (siehe Tabelle 6.2) werden die Ergebnisse der Auswertung für freie Strecken gezeigt. Wie man an dieser Tabelle sehen kann, gehen die Kapazitäten signifikant in die Höhe, wenn 100 % hochautomatisierte Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt unterwegs sind. In den nächsten Grafiken werden nochmals die Ergebnisse der einzelnen Netzelemente der freien Strecken visualisiert (siehe Abbildungen 5.4 bis 5.6).

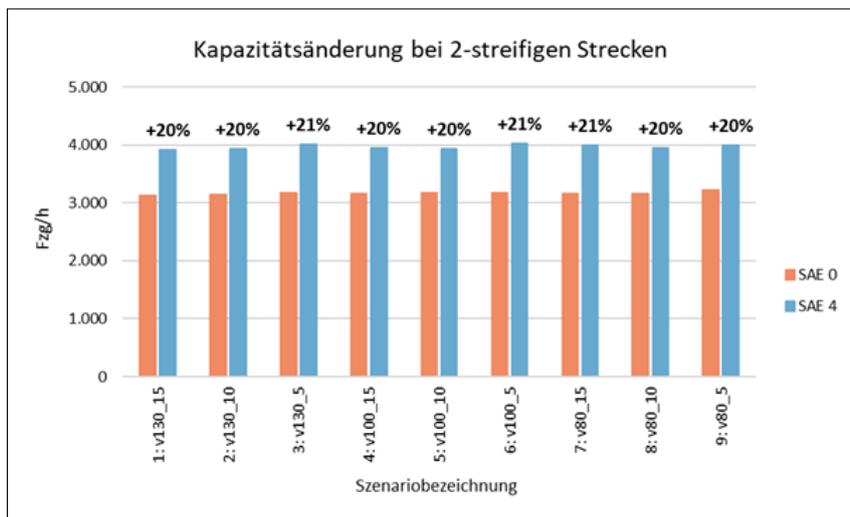


Abbildung 5.4: Kapazitätsänderung am 2-streifigen Streckenabschnitt

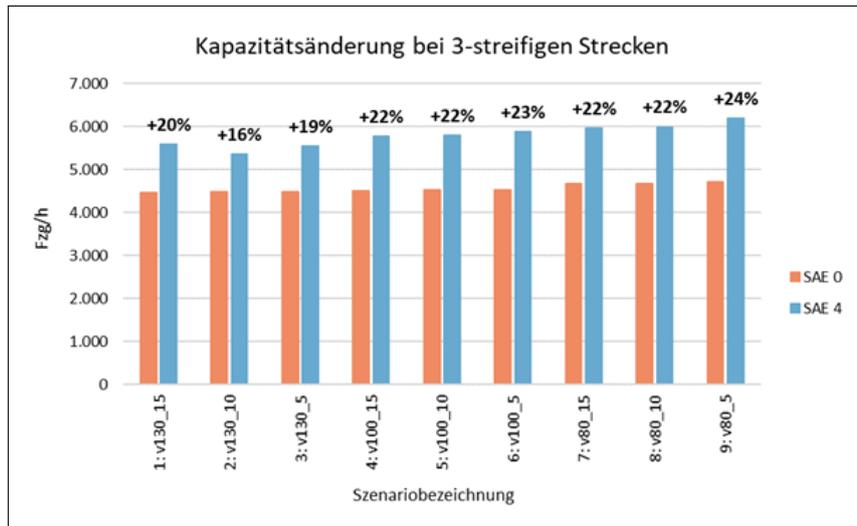


Abbildung 5.5: Kapazitätsänderung am 3-streifigen Streckenabschnitt

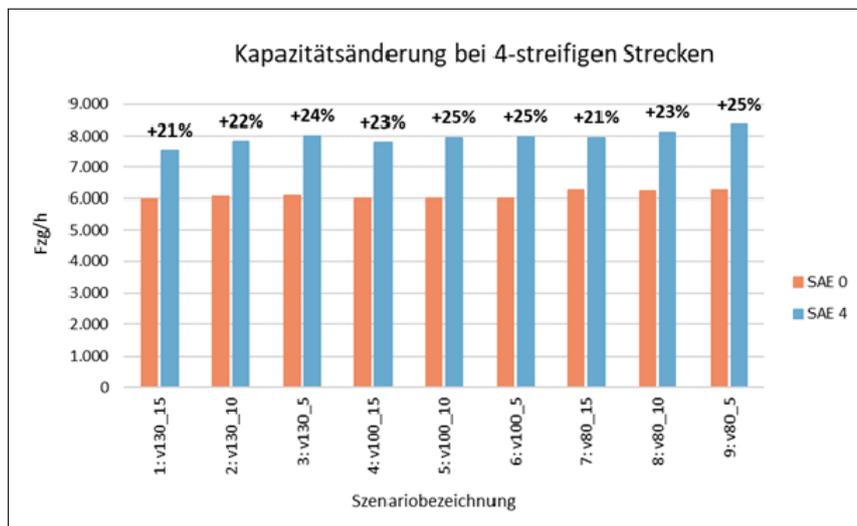


Abbildung 5.6: Kapazitätsänderung am 4-streifigen Streckenabschnitt

Man sieht bei den Diagrammen, dass die Erhöhung der Kapazität bei etwa 20 % liegt. Bei dem 2-streifigen Streckenabschnitt ist keine Schwankung über die einzelnen Szenarien erkennbar. Der Schwerverkehrsanteil und die Freifahrtgeschwindigkeit haben fast keine Auswirkung auf die Kapazität. Dies gilt sowohl für die SAE - Stufe 0 als auch für die Stufe 4. Der 3 - streifige Abschnitt weist eine höhere Schwankung bei der Kapazitätserhöhung auf. Hier gibt es eine Bandbreite von 8 %. Wobei es hier nur um die beiden Szenarien 2 und 3 handelt, die bei den Ergebnissen ein wenig aus der Norm fallen. Das größte Steigerungspotenzial hat die 4 - streifige Strecke. Hier kann das hochautomatisierte Fahren zu einer Erhöhung von 25 % der Leistungsfähigkeit führen.

In der folgenden Abbildung kann man die Änderung der Kapazität auf den jeweiligen Streckenabschnitten sehen. Hierfür werden die Mittelwerte über alle Szenarien ermittelt.

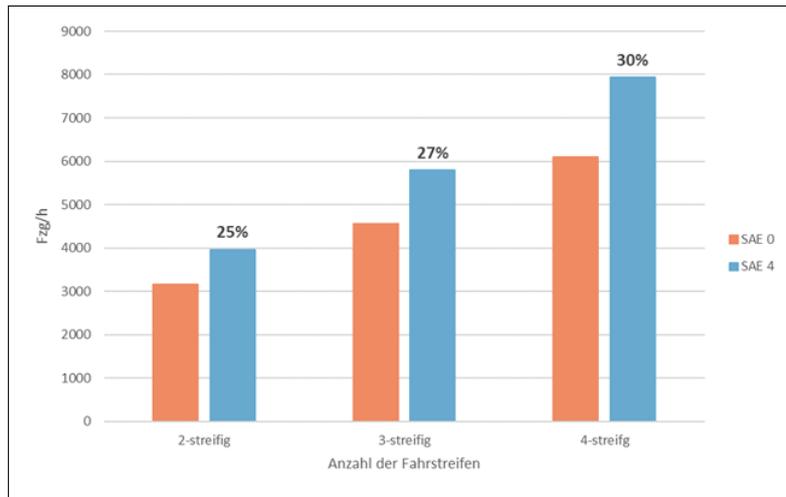


Abbildung 5.7: Kapazitätsänderung bei freien Strecken

5.1.3 Ergebnisse der Kapazitätsermittlung bei Anschlussstellen

Die Tabellen aus der Ermittlung der Kapazitäten für die Anschlussstellen werden im Anhang präsentiert (siehe Tabellen 6.3 und 6.4). Hierbei gibt es unterschiedliche Werte für den Messquerschnitt am Beginn und am Ende der Verflechtung. Wie man sehen kann, ist die Auswirkung von hochautomatisierten Fahrzeugen an Knotenpunkten auch deutlich. Der Unterschied der einzelnen SV - Anteile wiederum fällt eher gering aus. Wohingegen die Belastungsverhältnisse eine recht deutliche Auswirkung auf die Kapazität haben. Die nächsten Abbildungen zeigen wieder die grafische Darstellung der Tabellen und die prozentuale Änderung der Kapazität zur SAE - Stufe 4 (siehe Abbildungen 5.8) für das Netzelement 2+1RE.

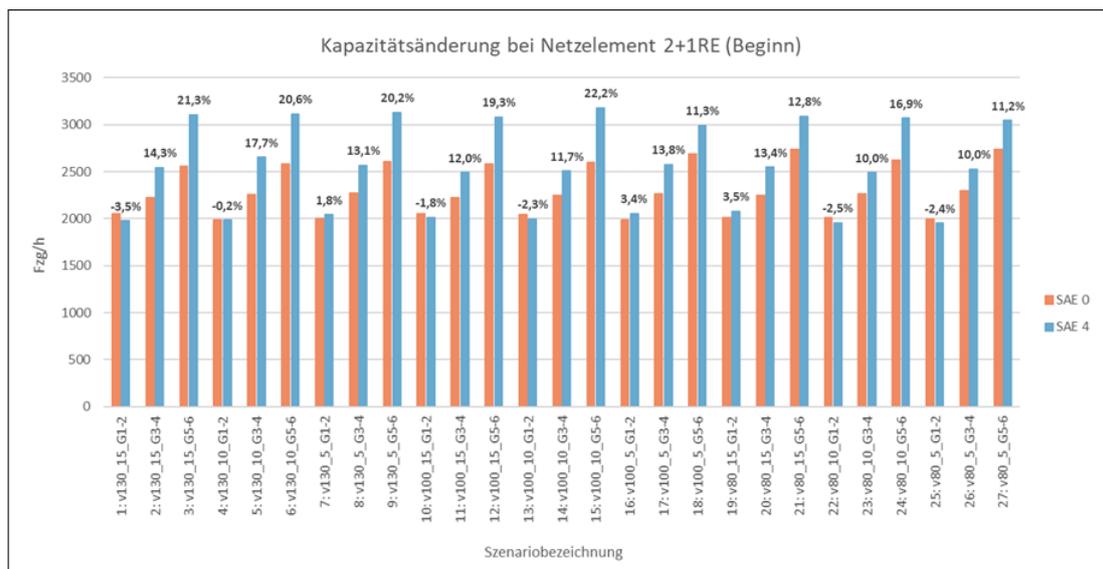


Abbildung 5.8: Kapazitätsänderung bei Netzelement 2+1RE (MQ „Beginn Verflechtung“)

Diese Abbildung zeigt deutlich den Einfluss der Belastungsverhältnisse auf die Kapazität. Es ist ein deutlicher Anstieg zwischen den G - Stufen zu beobachten (z.B.: Szenario 1-3). Auch der Unterschied zum hochautomatisierten Fahren erhöht sich mit abnehmendem Verhältnis. Auch zu beobachten ist der Kapazitätsverlust bei dem Belastungsverhältnis 1-2. Anscheinend verliert man bei einem starken Anteil an auffahrenden bzw. abfahrenden Verkehrsteilnehmern am Knotenpunkt den Vorteil eines hochautomatisierten Fahrzeugs. Dieser Nachteil ist beim Netzelement 3+1RE, das in der folgenden Abbildung visualisiert wird, fast gänzlich verschwunden (siehe Abbildung 5.9).

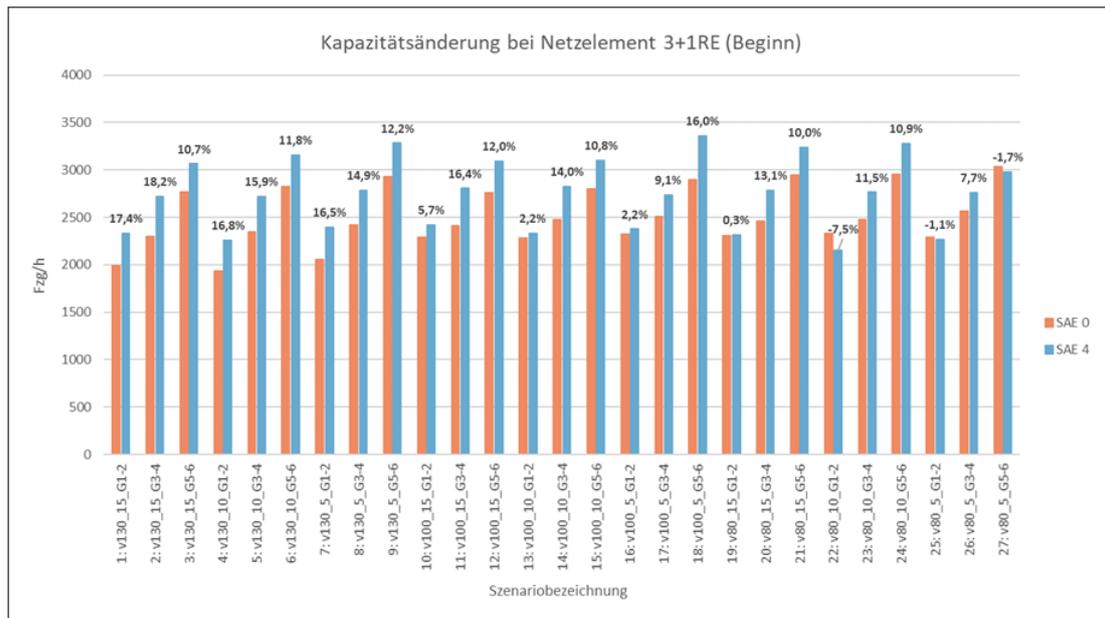


Abbildung 5.9: Kapazitätsänderung bei Netzelement 3+1RE (MQ „Beginn Verflechtung“)

Wenn ein zusätzlicher Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn vorliegt, ist das Problem des hohen Belastungsverhältnisses am Knotenpunkt reduziert. Der Nachteil hierbei liegt aber bei den niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Belastungen. Hier gibt es sogar einen Verlust von 7,5 % im Gegensatz zu menschlich gelenkten Fahrzeugen (siehe Szenario 22). Die Ausfahrt 2 - 1RA zeigt die gleichen Eigenschaften auf wie die Einfahrten und deshalb wird hier nicht näher darauf eingegangen. Schlussendlich kann man über den Messquerschnitt, der am Beginn der Verflechtungen liegt, sagen, dass der Gewinn der Leistungsfähigkeit bei hochautomatisierten Fahrzeugen an einem Knotenpunkt niedriger ausfällt als auf den freien Strecken. Wie es am Ende der Verflechtungen aussieht, zeigen die nächsten Ergebnisse (siehe Tabelle 6.4).

Wie schon bei den vorherigen Ergebnissen werden die Tabellenwerte wieder grafisch aufbereitet, um einen besseren Überblick über die Steigerung der Kapazität zu bekommen. Die folgenden Abbildungen zeigen sehr deutlich, dass am Ende der Verflechtung es zu keinen Einbußen der Kapazität bei den Einfahrten kommen wird. Da die Einreihung auf die Hauptfahrbahn schon abgeschlossen ist und in

Fahrtrichtung eine freie Strecke vorliegt, kann hier das hochautomatisierte Fahrzeug wieder bei allen Szenarien ihr gesamtes Potenzial ausschöpfen. (siehe Abbildungen 5.10 bis 5.11).

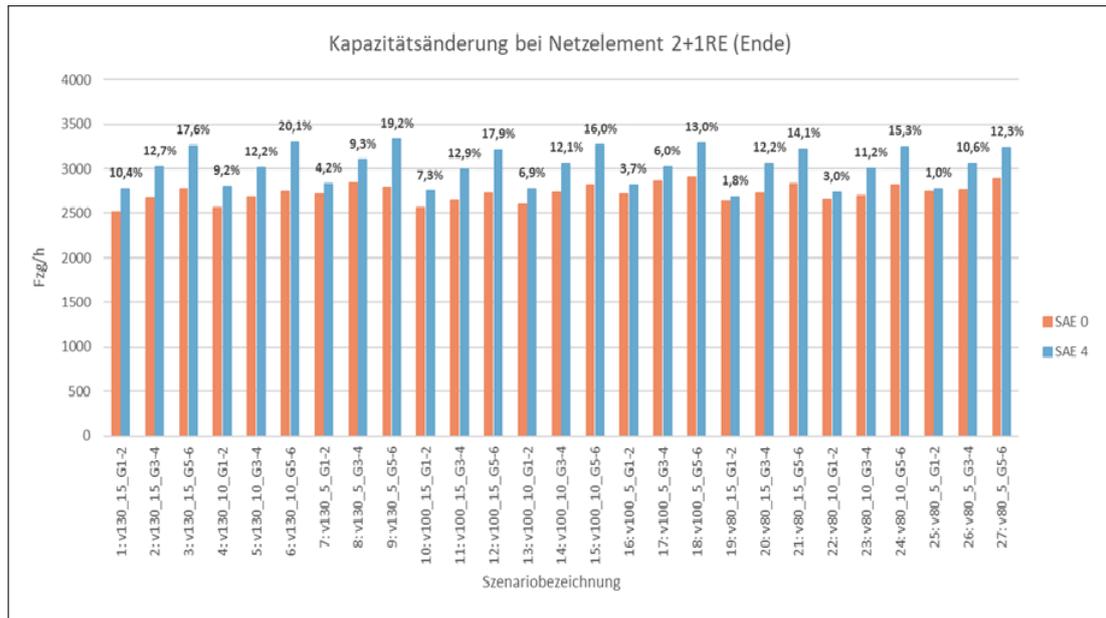


Abbildung 5.10: Kapazitätsänderung bei Netzelement 2+1RE (MQ „Ende Verflechtung“)

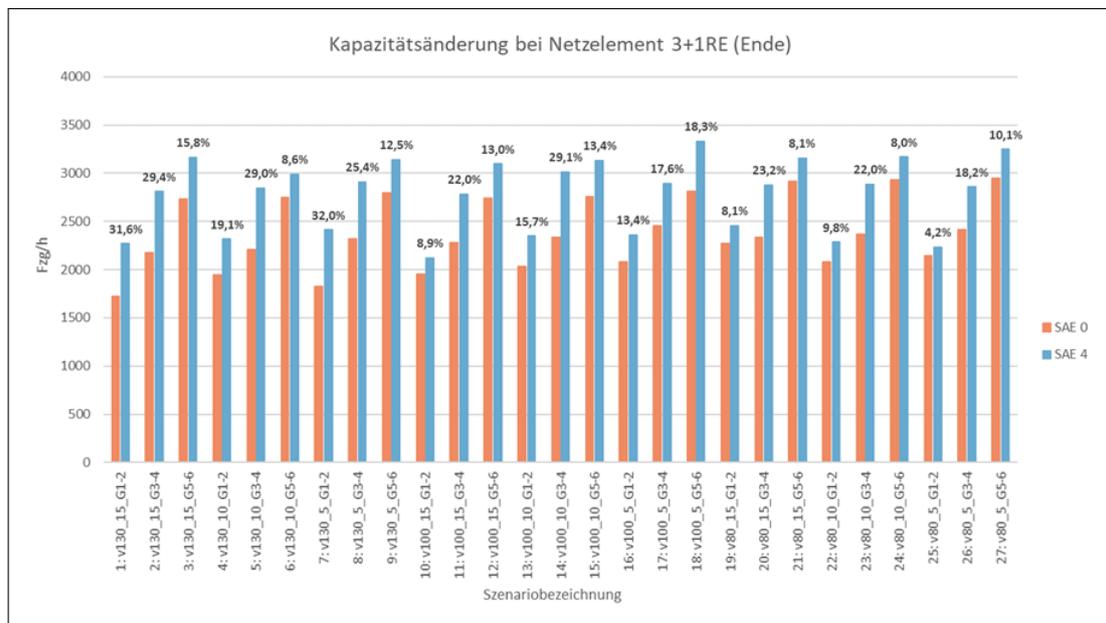


Abbildung 5.11: Kapazitätsänderung bei Netzelement 3+1RE (MQ „Ende Verflechtung“)

Bei einer dreistreifigen Hauptfahrbahn kann das SAE - Level 4 bei einigen Szenarien mehr hinzugewinnen als auf den freien Strecken. Dennoch haben bei diesem Netzelement die Belastungsverhältnisse eine größere Wirkung auf die Leistungsfähigkeit als bei 2+1RE. Wie schon beim vorherigen Messquerschnitt ist auch hier die Ähnlichkeit der Ausfahrt zu den Einfahrten sehr groß und wird hier nicht

näher erläutert.

Zum Abschluss findet man noch eine Abbildung, in der man die Kapazitätzunahme am gesamten Knotenpunkt sehen kann. Hier wurde der Mittelwert über beide Querschnitte und Szenarien der jeweiligen Netzelemente ermittelt (siehe Abbildung 5.12).

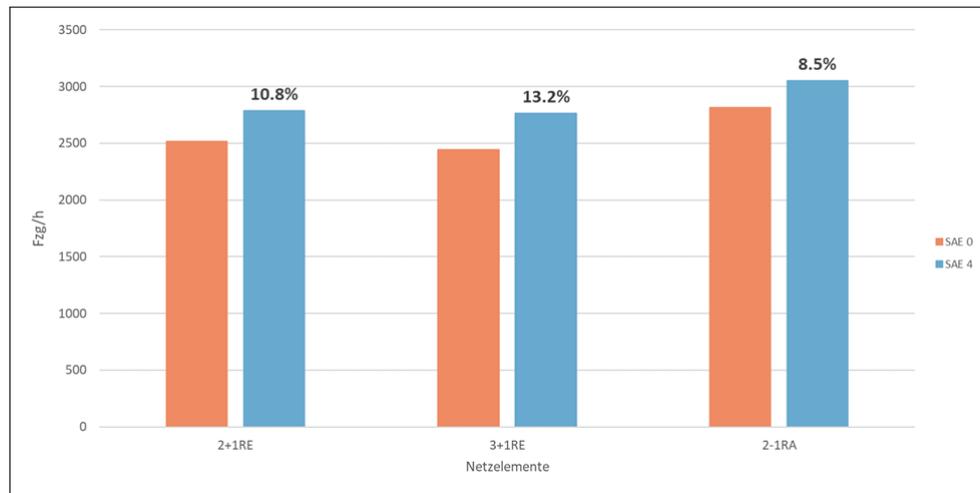


Abbildung 5.12: Kapazitätsänderung bei allen Netzelementen über beide Querschnitte

Wie schon angedeutet kann das hochautomatisierte Fahrzeug an den Knotenpunkten die Leistungsfähigkeit nicht so drastisch erhöhen wie bei den freien Strecken. Dies hat wiederum mit den Ein- bzw. Ausfädelungsvorgängen bei den Anschlussstellen zu tun.

Den übrigen typischen Netzelemente, die man in Tabelle 4.3 aufgezeigt sind und nicht mikroskopisch untersucht wurden, ist auch ein Kapazitätswert zugeordnet worden. Beispielhaft wird für das Netzelement 4+1 RE der selbe Wert zugeordnet wie dem 4 - streifigen Streckenabschnitt. Man geht hierbei davon aus, dass je höher die Fahrstreifenanzahl auf der Hauptfahrbahn ist, desto geringer ist die Einwirkung der Verflechtungsstrecken und deshalb wird der gleiche Wert verwendet wie auf einer freien Strecke. Dies gilt auch für alle anderen typischen Netzelemente, für die in der vorliegenden Arbeit keine eigene Kapazität ermittelt wurde.

5.2 Streckentypfeine CR - Kurven

Dieses Kapitel wird die Ergebnisse zur Ermittlung der CR - Funktionen präsentieren. Es wird der Vergleich zwischen dem Level 0 und dem Level 4 hergestellt. Auch wenn das Problem, das in Kapitel 3.3 angesprochen wurde, besteht, kommt man bei den hochautomatisierten Fahrzeugen dennoch zu brauchbaren Ergebnissen. Die Parameter der beiden Stufen weisen einen großen Unterschied auf und deshalb werden diese Werte auch für die Simulationen im Makronetz verwendet. Im Folgende werden die Ergebnisse pro Fahrstreifenanzahl unterteilt und jeweilig der Unterschied zwischen diesen beiden

Stufen visualisiert.

5.2.1 CR - Funktionen für 2 - streifigen Streckenabschnitt

Wie man in den folgenden Abbildungen (5.13 bis 5.15), die in diesem Kapitel gezeigt werden, erkennen kann, werden pro Querschnitt immer vier verschiedene Funktionen ermittelt. Hierbei handelt es sich um die drei wichtigen Typen, die schon in Kapitel 2.3 besprochen wurden. Es wurde nur eine Änderung durchgeführt. Bei der BPR - Funktion gibt es keine Schätzung des Parameters α sondern nur die des Parameters β , da die gleichzeitige Schätzung der beiden Werte zu keinen brauchbaren Ergebnissen geführt hat. Dafür werden aber zwei Funktionen gebildet, einerseits mit einem fixen Parameter $\alpha = 0,8$ und $\alpha = 1$, und der Parameter β wird geschätzt. Dies sind Werte für α , die in der Verkehrsmodellierung häufig verwendet werden. Abbildung 5.13 zeigt einen exemplarischen Querschnitt des 2 - streifigen Streckenabschnittes mit einer Freifahrtgeschwindigkeit von 130 km/h.

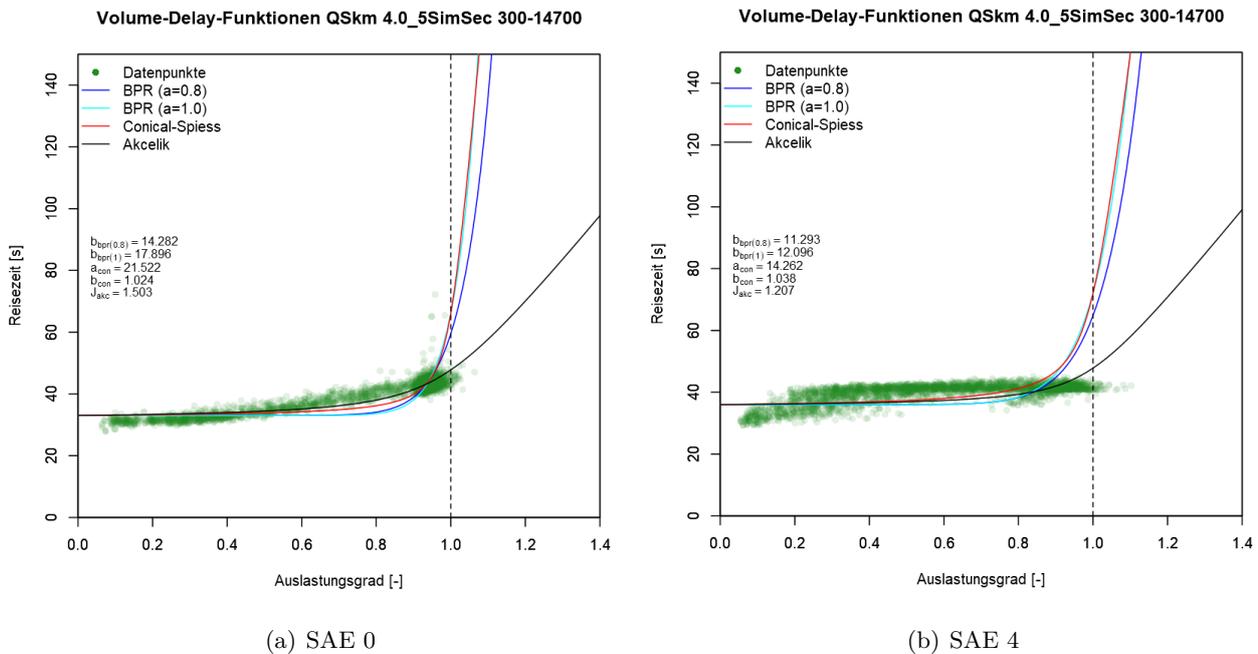


Abbildung 5.13: CR - Funktionen anhand eines 2 - streifigen Querschnittes

Hier kann man den Unterschied des Verlaufes der Datenpunkte gut beobachten. Bei SAE Level 0 gibt es eine große Anzahl an Punkten an der Auslastungsgrenze, die auch eine höhere Reisezeit aufweisen. Die Kapazitäten liegen bei der linken Abbildung bei 3153 Fzg/h und in der rechten Abbildung bei 3954 Fzg/h. Auch der monoton steigende Verlauf der Datenpunkte ist gut zu erkennen. Im Gegensatz zum Level 4, wo eine kurze Steigung am Anfang zu beobachten ist, aber je höher die Auslastung ist desto mehr pendeln sich diese Datenpunkte bei einer gewissen Reisezeit ein. Hier ist keine Steigung mehr zu beobachten. Die Parameterwerte weisen einen Verfall in Richtung des Levels 4 auf. Das heißt,

dass die Steigung der Kurve nach der Erreichung der Auslastung nicht so steil ist wie bei Level 0 und die Reisezeiterhöhung deutlich geringer ausfällt, nachdem die Kapazität erreicht wird. Man hat, wie bei der Kapazitätsermittlung wieder drei Querschnitte pro Streckenabschnitt. Der resultierende Wert pro Streckenabschnitt und Freifahrtsgeschwindigkeit wird aus diesen drei Werten gemittelt und ist für die 2 - streifigen Querschnitte in der Tabelle 5.1 zu finden.

Level	Geschw. [km/h]	BPR		Conical		Akcelik
		b	b	a	b	J_A
		a=0.8	a=1.0			
SAE 0	130	12,4	16,2	19,0	1,0	1,7
	100	25,9	28,9	36,0	1,0	0,7
	80	20,9	21,7	27,5	1,0	0,6
SAE 4	130	13,0	13,8	16,2	1,0	1,0
	100	16,7	17,0	20,3	1,0	0,4
	80	16,2	16,4	19,8	1,0	0,5

Tabelle 5.1: Parameterwerte von CR - Funktionen des 2 - streifigen Streckenabschnittes

Diese Tabelle zeigt die Änderung der Parameter hinsichtlich der Geschwindigkeit und des SAE Levels. Je höher der Parameter ausfällt, desto steiler ist die Funktion nach Erreichung der Kapazität und desto höher ist die Reisezeitzunahme ab diesem Punkt. Man kann hier sehen, dass auch wenn die ermittelten CR - Funktionen für das Level 4 nicht sehr treffend sind, die Parameterwerte dennoch sehr wesentlich geringer werden. Das heißt, dass die Reisezeitänderung bei einer höheren Automatisierung sehr wahrscheinlich rückläufig ist, wenn die Strecke zu ihrer Auslastungsgrenze kommt. Ergebnisse in der makroskopischen Untersuchung, die im nächsten Kapitel sich befinden, werden vielleicht diese These stützen.

5.2.2 CR - Funktionen für 3 - streifigen Streckenabschnitt

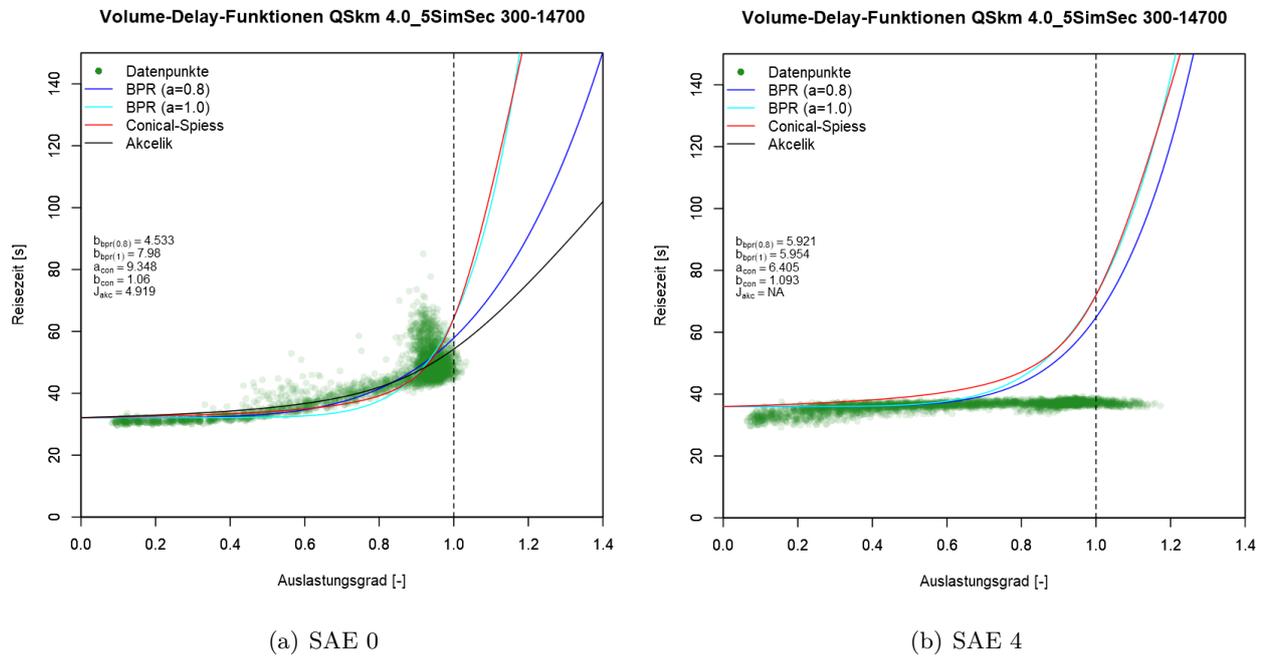


Abbildung 5.14: CR - Funktionen anhand eines 3 - streifigen Querschnittes

Die Abbildung 5.14 rechts zeigt nochmals das Problem des SAE Level 4 deutlich. Die Funktionen steigen viel zu früh in deren Reisezeit an. Hier kann man deutlich ablesen, dass sich die gewählten Funktionen nicht sehr gut für diese Automatisierungsstufe eignen. Die folgende Tabelle 5.2 zeigt wieder die gemittelten Parameterwerte über die drei Querschnitte auf einem 3 - streifigen Straßenabschnitt.

Level	Geschw. [km/h]	BPR		Conical		Akcelik
		b a=0.8	b a=1.0	a	b	J_A
SAE 0	130	10,0	13,3	17,5	1,0	4,5
	100	11,9	13,9	14,9	1,0	2,2
	80	28,9	30,7	38,5	1,0	0,8
SAE 4	130	8,7	8,6	9,9	1,1	NA
	100	9,7	9,9	11,2	1,0	0,7
	80	16,1	16,4	19,5	1,0	0,7

Tabelle 5.2: gemittelte Werte der Parameterschätzung von CR - Funktionen des 3 - streifigen Streckenabschnittes

An diesen Werten kann man das gleiche erkennen, wie schon beim 2 - streifigen Querschnitt, dass die Parameterwerte deutlich geringer ausfallen wenn hochautomatisierte Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt fahren.

5.2.3 CR - Funktionen für 4 - streifigen Streckenabschnitt

Schlussendlich werden noch die Ergebnisse eines 4 - streifigen Querschnittes gezeigt.

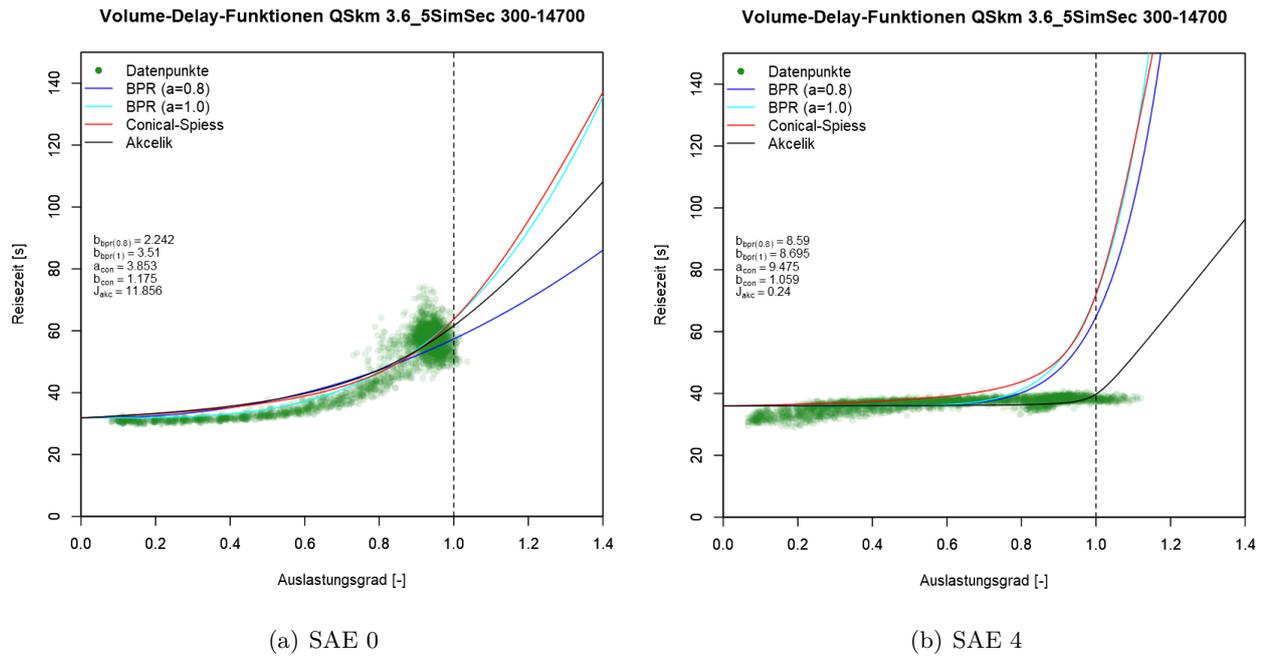


Abbildung 5.15: CR - Funktionen anhand eines 4 - streifigen Querschnittes

Ergänzend werden auch hier in folgender Tabelle 5.3 die gemittelten Parameterwerte aufgelistet.

Level	Geschw. [km/h]	BPR		Conical		Akcelik
		b	b	a	b	J_A
		a=0.8	a=1.0			
SAE 0	130	2,6	4,1	4,7	1,2	10,9
	100	9,2	11,6	12,4	1,0	4,7
	80	45,7	48,1	60,5	1,0	0,7
SAE 4	130	9,3	9,4	10,6	1,1	0,3
	100	11,2	11,6	13,6	1,1	0,9
	80	15,6	16,0	19,4	1,0	1,2

Tabelle 5.3: gemittelte Werte der Parameterschätzung von CR - Funktionen des 4 - streifigen Streckenabschnittes

Das Problem, das hierbei auftritt, ist, dass man für die BPR - Funktion keine größeren β - Werte als 10 eingeben kann. Da der Großteil der Ergebnisse einen Wert von über 10 aufweisen, kann also nicht mit dieser Funktion das makroskopische Netz verwendet werden. Die Akcelik - Funktion ist für die weiteren Simulationen auch nicht relevant, da sie bei jeder Auswertung eine zu geringe Steigung nach der Auslastungsgrenze aufweist. Die Conical - Spiess - Funktion ist von der Form der BPR - Funktion sehr ähnlich und deshalb wird auch diese für die weiteren Zwecke verwendet und in das Makronetz eingebaut.

5.3 Makroskopische Untersuchung

Das letzte Kapitel in den Ergebnissen beschäftigt sich schlussendlich mit der makroskopischen Betrachtung von hochautomatisierten Fahrzeugen. Hierbei werden die Ergebnisse von der Kapazitätsermittlung der Bestimmung von CR - Funktionen in das Makronetz eingespielt und ausgewertet. Zu Beginn dieses Kapitels wird das gesamte A+S - Netz Österreichs zur Auswertung herangezogen. Man wird aber im Verlaufe das Netz in Regionalklassen laut „Österreich unterwegs“ einteilen. Es werden die makroskopischen Kenngrößen, die in Kapitel 4.8 besprochen wurden, zur Unterscheidung der SAE - Stufe 0 zur Stufe 4 analysiert und dargestellt. Im Zuge dieser Arbeit sind mehrere Stunden des Tages untersucht worden (siehe Tabelle 4.4). Für die weiteren Ergebnisse in diesem Kapitel wird nur die Morgenspitze von 07:00 Uhr bis 08:00 und von 12:00 bis 13:00 herangezogen. Die weiteren Abbildungen und Ergebnisse der anderen Stunden kann man im Anhang betrachten.

Der Auslastungsgrad ist eine sehr wichtige Kenngröße zur Bewertung von Autobahnabschnitten. Fol-

gende Abbildungen zeigen die Verteilung der LOS - Stufen auf das hochrangige Streckennetz Österreichs und den Unterschied zwischen den beiden Levels.

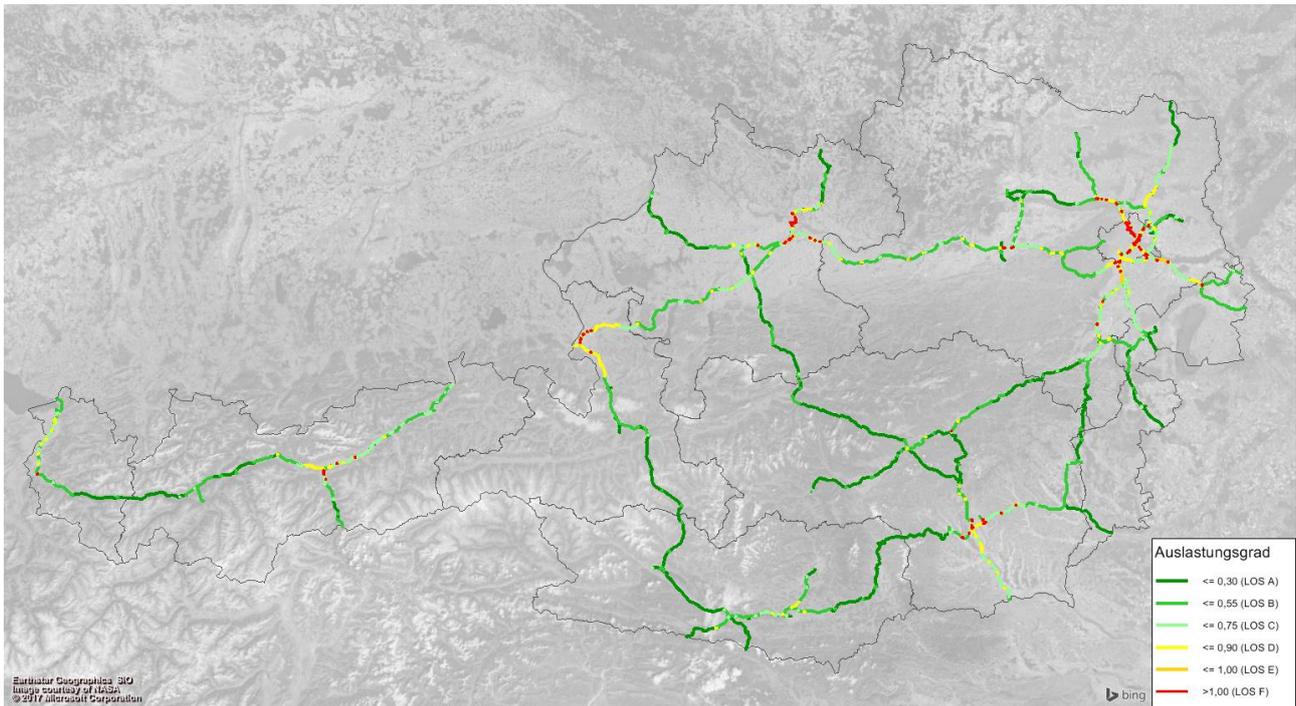


Abbildung 5.16: Auslastungsgrad: SAE 0 von 07:00 bis 08:00

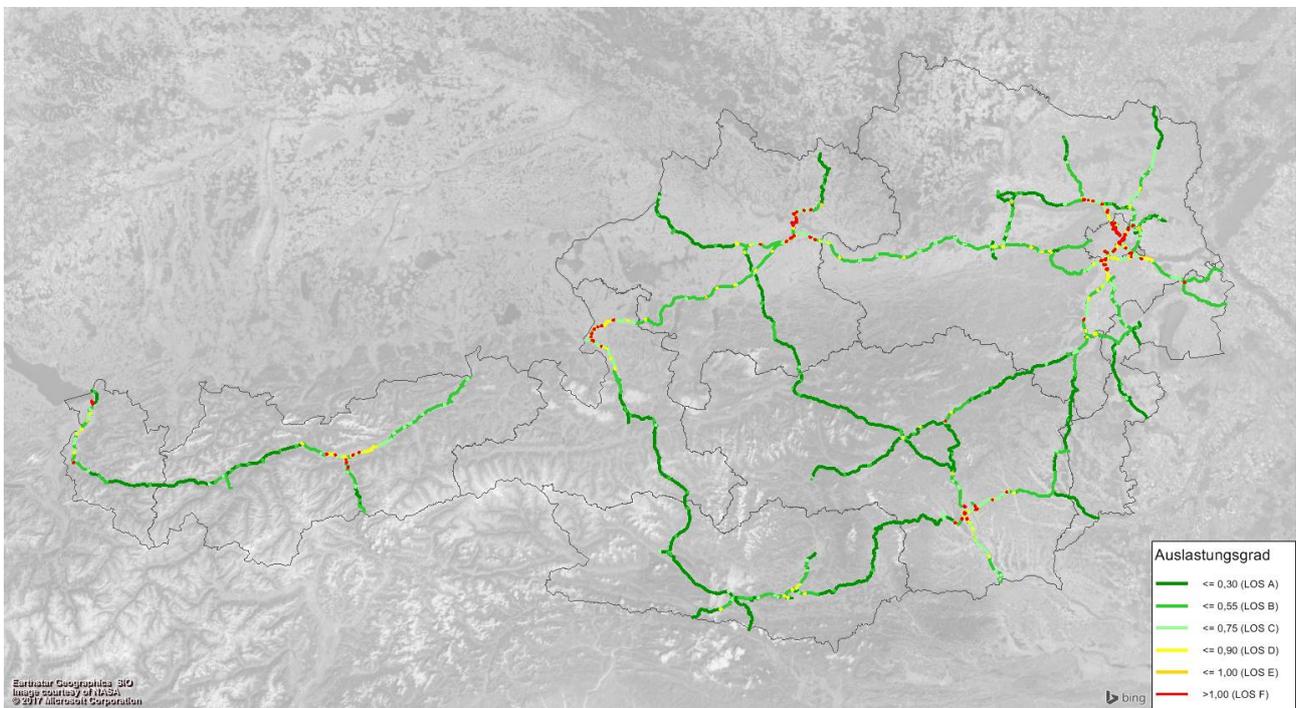


Abbildung 5.17: Auslastungsgrad: SAE 4 von 07:00 bis 08:00

Der Unterschied ist auf diesen Abbildungen kaum auszumachen. Da sich die Kapazitäten sich um 20%

erhöhen, bekommt man im Endresultat eine LOS - Stufe niedriger raus. Da dies das Maximum ist, ist dieser Unterschied sehr gering. Um aber die Abbildungen noch ein wenig besser darzustellen, sieht man in Tabelle 5.4 die Verteilung der einzelnen Strecke auf die LOS - Stufen und die Änderung zum Level 4.

SAE 0	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	7 442	5 428	2 227	900	212	412
Länge [km]	2 624	2 024	712	210	50	61
Anteil	46%	33%	13%	5%	1%	2%
SAE 4						
Anzahl Strecken	8 534	5 228	1 696	526	154	483
Länge [km]	3 102	1 920	442	116	32	69
Anteil	52%	31%	10%	3%	1%	3%

Tabelle 5.4: Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (07:00 bis 08:00)

Wie man an dieser Tabelle sehr gut sehen kann, ist, dass die Anzahl der Strecken mit der LOS - Stufe A sich beim hochautomatisierten Fahren erhöhen. Das heißt, dass die Qualitätsstufe sich erhöht. Man kann aber auch eine Verschlechterung beobachten. Um diesen Effekt zu erklären, bedarf einer weiteren Tabelle (siehe Tabelle 5.5), die die Anzahl der Rampen in den unterschiedlichen Qualitäten aufzeigt. Da die Rampen an Autobahnanschlussstellen in den Mikrosimulationen nicht beachtet und deshalb auch keine Änderungen im Makronetz vorgenommen wurden, werden diese auch der Grund für die Verschlechterung bei hochautomatisierten Fahrzeugen sein. Da sich die Kapazität auf den freien Strecken erhöht, werden mehr Fahrzeuge auf diesen Streckenabschnitten angezogen. Da sich aber die Kapazität der Auffahrts- bzw. Abfahrtsrampen der Autobahnen (SAE 0 und 4) nicht ändert, erhöhen sich die Auslastungen an den Rampen.

SAE 0	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Rampen	2914	1136	444	240	83	193
Anteil an LOS	39%	21%	20%	27%	39%	47%
SAE 4						
Anzahl Rampen	2873	1106	448	206	85	292
Anteil an LOS	34%	21%	26%	39%	55%	60%

Tabelle 5.5: Anteil der Rampen an LOS (07:00 bis 08:00)

Die Ergebnisse dieser Tabelle zeigen den Anstieg der Anteile der Rampen in den jeweiligen LOS

- Stufen. Diese Strecken machen den Großteil der schlechten Qualität auf Österreichs Straßen aus. Wie schon vorher erwähnt, steigt der Anteil der Rampen bei Stufe F und beim hochautomatisierten Fahren. Deshalb gibt es auch eine Verschlechterung der Qualität im Gesamten. Letztendlich wird noch die Änderung des Auslastungsgrades anhand der typischen Netzelemente aufgezeigt (siehe Tabelle 5.6). Hierbei handelt es sich um Mittelwerte über die jeweiligen Elemente. Die Auslastungsstatistik zeigt, dass die im Mittel am stärksten ausgelasteten Elemente nicht die den häufigsten Netzelementen (siehe Tabelle 4.3) entsprechen, sondern durch den Typ 3+1RE bzw. 2-2RA vertreten sind.

Netzelement	Auslastung (SAE 0)	Auslastung (SAE 4)
Einfahrten		
1+1RE	0,28	0,28
2+1RE	0,41	0,42
2+2RE	0,34	0,29
3+1RE	0,77	0,73
3+2RE	0,48	0,43
4+1RE	0,64	0,58
4+2RE	0,60	0,54
Ausfahrten		
1-1RA	0,20	0,20
2-1RA	0,36	0,35
2-2RA	0,73	0,66
3-1RA	0,47	0,42
3-2RA	0,59	0,56
4-1RA	0,71	0,64
4-2RA	0,72	0,66

Tabelle 5.6: Auslastungsgrad typischer Netzelemente an Anschlussstellen im A+S - Netz Österreich

Diese Tabelle wird nur für die Morgenspitze ermittelt, da der Unterschied der Auslastung bei den Netzelementen sich im gleichen Bereich befinden.

Nachdem die Morgenspitze von 07:00 Uhr - 08:00 Uhr ausgewertet wurde, werden im Folgenden die Auswirkung des hochautomatisierten Fahrens von 12:00 Uhr bis 13:00 Uhr betrachtet (siehe Abbildungen 5.18 und 5.19).

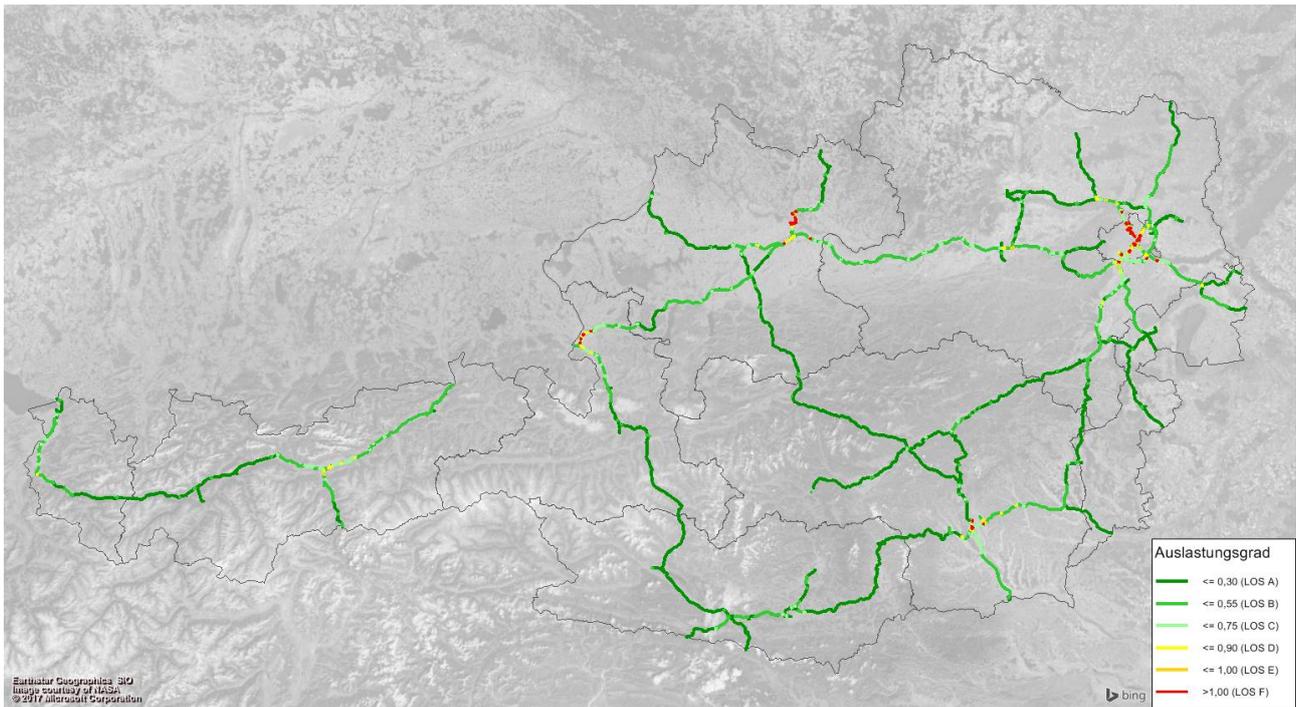


Abbildung 5.18: Auslastungsgrad: SAE 0 von 12:00 bis 13:00



Abbildung 5.19: Auslastungsgrad: SAE 4 von 12:00 bis 13:00

Man sieht deutlich den Anstieg der Qualität durch die niedrigere Belastung im Netz. Der Unterschied zum SAE - Level 4 fällt dennoch gleich aus wie schon bei der Morgenspitze. Tabelle 5.7 zeigt wiederum die Anzahl der Strecken in den unterschiedlichen LOS - Stufen.

SAE 0	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	10 203	4 735	1 148	243	125	167
Länge [km]	3 642	1 693	260	41	22	22
Anteil	61,4%	28,5%	6,8%	1,5%	0,8%	1,0%
SAE 4	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	11 649	3 874	710	161	70	157
Länge [km]	4 318	1 170	133	28	10	21
Anteil	70,1%	23,3%	4,3%	1,0%	0,4%	0,9%

Tabelle 5.7: Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (12:00 bis 13:00)

Es zeigt wiederum den gleichen Anstieg auf der höchsten LOS - Stufe A. Hier geht der Anteil der Strecken um fast 9% rauf. In der Morgenspitze waren es rund 6%. Der Anteil der Rampen und der Auslastungsgrad der einzelnen Netzelemente wird hier nicht mehr gezeigt, da es sich hier um keine Änderungen des Unterschiedes zwischen SAE - Level 0 und Level 4 ergeben. Deshalb werden die beiden anderen Stunden (Abendspitze von 17:00 Uhr bis 18:00 Uhr und die Stunde 21:00 Uhr bis 22:00 Uhr) hier nicht weiter betrachtet, da sie ähnliche Erkenntnisse liefern. Die Abbildungen und Tabellen findet man im Anhang (siehe Abbildungen 6.1 bis 6.5 und Tabellen 6.5 bis 6.7).

Um die Tabellen 5.4 und 5.7 zu visualisieren, wird hierzu Boxplots erstellt, die die Verteilung der Auslastungen in den einzelnen SAE - Levels darstellen sollen.

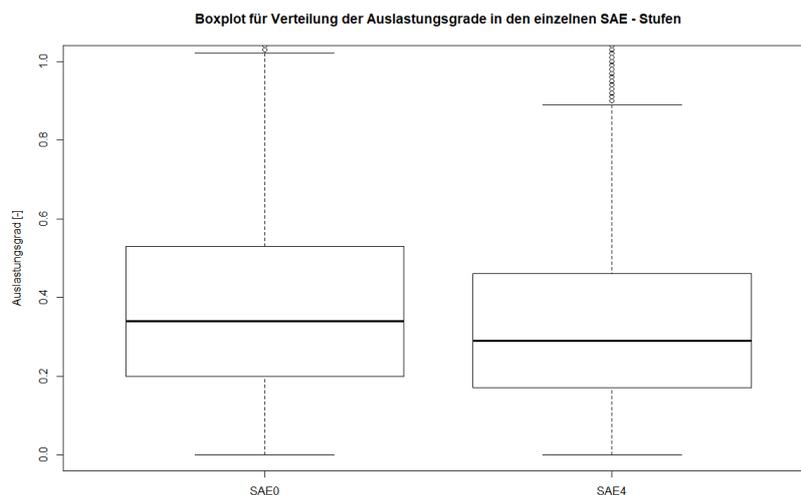


Abbildung 5.20: Boxplot (07:00 Uhr bis 08:00 Uhr)

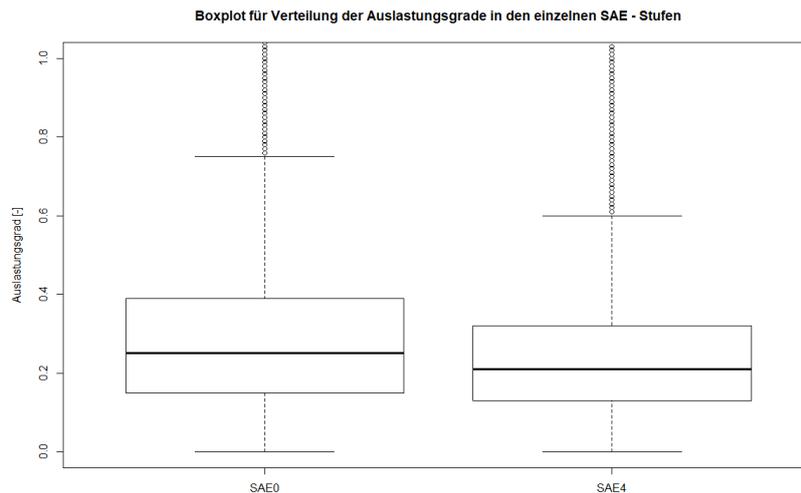


Abbildung 5.21: Boxplot (12:00 Uhr bis 13:00 Uhr)

Diese beiden Abbildungen zeigen, dass, wie schon vorher erwähnt, der Unterschied zwischen den beiden Levels immer ungefähr bleibt. Aber man sieht sehr gut, dass das Maximum des Auslastungsgrades (beim Boxplot der obere „Whiskers“) reduziert wird. Bei SAE 0 ist die Reduzierung bei ungefähr 20%, was eine ganze LOS - Stufe bedeutet. Bei SAE 4 ist es noch ein wenig mehr, denn hier handelt es sich um rund 30%. Aber dies ist auf die Belastungsänderung zwischen den Stunden zurückzuführen. Das hochautomatisierte Fahren hat in den jeweiligen Stunden dieselbe Auswirkung auf den Auslastungsgrad. Da man die Kapazität erhöht und diese direkten Einfluss auf die Qualitätsstufe hat, war mit diesem Ergebnis vorher schon zu rechnen. Doch auch die anderen Kenngrößen sollen die positive Wirkung der SAE - Stufe 4 aufzeigen.

Nach dem Auslastungsgrad ist es auch wichtig zu wissen, wie sich die Reisezeit im Netz ändert. Hier muss die Frage beantwortet werden, ob eine technologische Weiterentwicklung des Fahrzeugs auch eine Verkürzung der Reisezeit auf dem A+S - Netz entspricht. Folgende Tabellen 5.8 und 5.9 sollen dabei Abhilfe leisten. Die Reisezeit wird im makroskopischen Netz durch eine Kenngrößenmatrix ausgegeben. Diese muss nach jeder Umlegung neu berechnet werden. Diese gibt Auskunft über die aktuelle Reisezeit von Bezirk i zu Bezirk j . Um die Wirkung der hochautomatisierten Fahrzeuge auf die Reisezeit näher zu bringen, werden zwei Strecken ausgewählt (Graz - Wien und Eisenstadt - Bregenz). Auch hier werden die beiden Stunden wie vorhin verwendet, um den Unterschied zwischen der Morgenspitze und der Mittagsstunde aufzuzeigen.

	Reisezeit (SAE 0)	Reisezeit (SAE 4)
	[min]	[min]
Graz - Wien (I. Innere Stadt)	149	141
Eisenstadt - Bregenz	490	480
Innsbruck - Linz	221	208
Salzburg - Wien	216	205
Graz - Innsbruck	322	316

Tabelle 5.8: Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 07:00 bis 08:00

	Reisezeit (SAE 0)	Reisezeit (SAE 4)
	[min]	[min]
Graz - Wien (I. Innere Stadt)	138	137
Eisenstadt - Bregenz	447	443
Innsbruck - Linz	205	202
Salzburg - Wien	202	199
Graz - Innsbruck	307	306

Tabelle 5.9: Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 12:00 bis 13:00

Die Änderung der Reisezeit ist sehr marginal zwischen den beiden SAE - Stufen. Aber hier muss man wieder das Problem der CR - Kurven erwähnen. Diese sind für die Berechnung der aktuellen Reisezeit zuständig und da man bei hochautomatisierten Fahrzeugen auch von einem Reisezeitanstieg bei der Erreichung der Kapazität ausgeht, die laut Datenpunkten aber nicht vorhanden ist, kommen hier fast keine Unterschiede in der Berechnung der Reisezeit zustande.

Abschließend wird noch die letzte Kenngröße in dieser Arbeit verglichen. Hierbei wurden im Modell neue Gebiete erstellt, die den Raumtypen laut „Österreich unterwegs“ entsprechen (vgl. [23]). Es gibt vier verschiedene Raumtypen, die im Folgenden aufgezählt sind:

- Wien
- Großstädte ohne Wien
- zentrale Bezirke
- periphere Bezirke

Für die Ergebnisse der Fahrleistung im Verkehrsmodell sind nur die ersten drei Typen wichtig. Abbildung 5.22 zeigt die genaue Einteilung der Raumtypen im österreichischen Streckennetz.

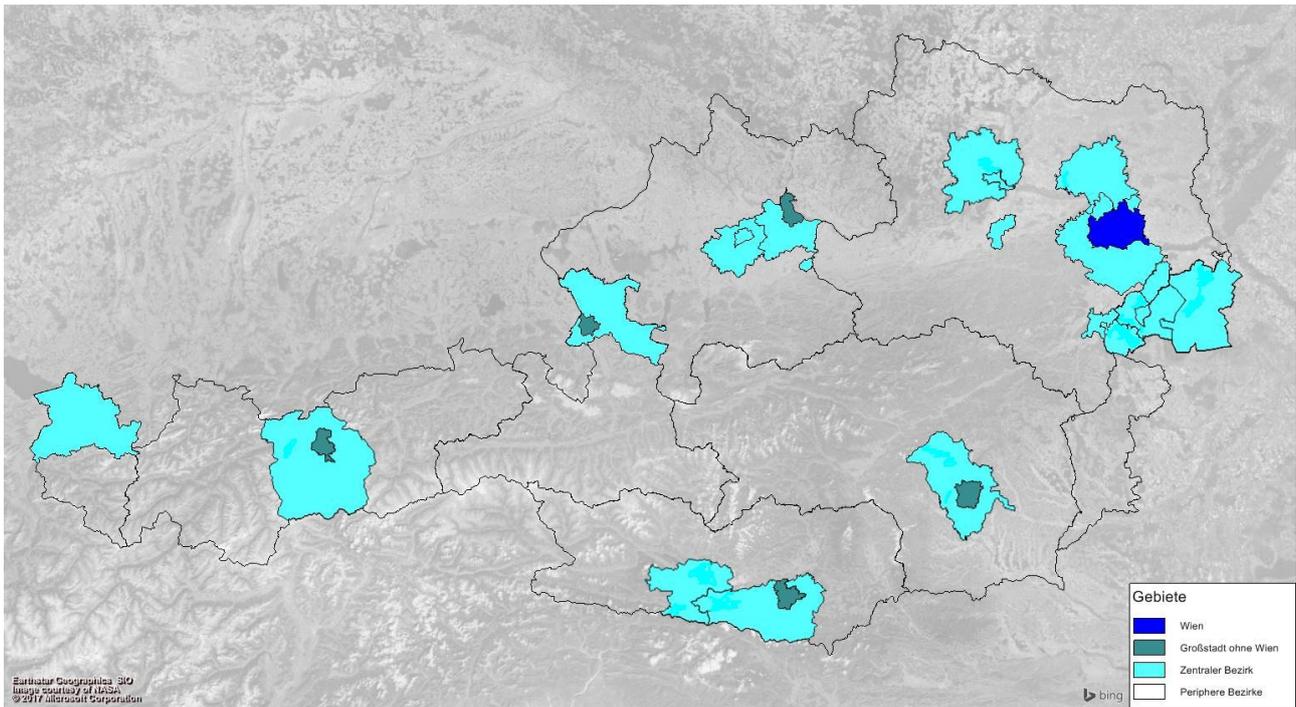


Abbildung 5.22: Raumtypen in Österreich

Folgende Tabelle 5.10 zeigt die Fahrzeugkilometer, die innerhalb eines solchen Gebietes zurückgelegt werden. Hierfür werden beispielhaft nur ein Gebiet pro Raumtyp ausgewertet. Für die Großstädte werden die Ergebnisse exemplarisch für Graz ermittelt und Graz - Umgebung wird als Beispiel für die zentralen Bezirke verwendet.

Gebiet	Streckenlänge	Fzg.km / Tag	Fzg.km / Tag
	[km]	(SAE 0)	(SAE 4)
Wien	218	6 329 458	8 203 895
Graz	46	298 530	768 937
Graz - Umgebung	196	3 490 652	3 734 187

Tabelle 5.10: Vergleich Fahrzeugkilometer pro Tag anhand unterschiedlicher Gebiete

Die Ergebnisse zeigen einen 30%-igen Anstieg der Fahrzeugkilometer pro Tag in Wien. Aber nicht nur in Wien kommt es zu einer Erhöhung, auch in Graz, wo die Streckenlänge des A+S - Netzes nur 46 km beträgt steigt die Fahrleistung um mehr als das Doppelte. Da man im Verkehrsmodell als Kenngröße die Fahrzeugkilometer nur pro Tag ausgeben kann, bestehen auch keine Ergebnisse für die unterschiedlichen Stunden. Doch trotz dieser Erhöhung der Fahrleistung auf dem hochrangigen Straßennetz kommt es dennoch zu kürzeren Reisezeiten, wie man an den Tabellen 5.8 und 5.9 gesehen hat.

6 | Zusammenfassung

Zusammenfassend zu sagen ist, dass das SAE Level 4 eine positive Auswirkung auf den Verkehr am hochrangigen Streckennetz Österreichs haben wird. Viele Autoren haben schon ähnliche Beobachtungen in anderen Ländern gemacht und auch hier werden diese Ergebnisse geteilt. Vor allem bei der Kapazität ist eine große Veränderung in Zukunft möglich, die vor allem auf Autobahnen und Schnellstraßen zu merken sein wird. Der geringe Abstand, der hier gefahren werden kann, aber auch der homogenere Verkehrsfluss durch die Automatisierung der Fahrzeuge führen dazu, dass die Leistungsfähigkeit auf dem hochrangigen Streckennetz erhöht wird. Auf freien Strecken kann das Potenzial dieser Fahrzeuge voll ausgenutzt werden. Hier wird eine Erhöhung der Kapazität um rund 27% erreicht. An den Autobahnanschlussstellen sieht es ein wenig anders aus. Hier kommt es sogar zu Verminderungen von maximal 7,5% bei einzelnen Szenarien. Wenn man aber die gemittelten Werte über alle Szenarien für die Auf- und Abfahrten betrachtet, kommt man auch hier zu einer Erhöhung der Kapazität von 11%. Um die einzelnen Verminderung auch zu beseitigen, bedarf es einer höheren Stufe der Automatisierung. Die Literatur hat gezeigt, dass bei kommunizierenden Fahrzeugen die Kapazität in jeder Situation erhöht wird. Das einzige Problem, das hier besteht ist, dass man eine Penetrationsrate von mindestens 80% braucht, um auch diese Ergebnisse zu stützen. Bevor dies erreicht wird, kann auch auf dieser Stufe der Automatisierung nicht das volle Potenzial ausgenutzt werden. Neben den Kapazitäten sind auch die Widerstandsfunktionen, die die aktuelle Reisezeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke abbildet, ein sehr wichtiges Thema, das im Zuge dieser Arbeit ausführlich besprochen wurde. Um die höheren Stufen der Automatisierung abzubilden, bedarf es einigen Überlegungen und neuen Ansätzen. Das Problem ist in dieser Arbeit angesprochen worden, aber für die Zukunft ist es wichtig, dieses zu lösen. Mit den CR - Funktionen, mit denen man bis jetzt sehr häufig in der Verkehrsmodellierung arbeitet, sind nicht ausreichend um die Reisezeit des automatisierten Verkehrs abzubilden. Diese Funktionen sind so aufgebaut, dass ein stetiger Anstieg dieser Reisezeit vorliegt und somit eine monoton steigende Funktion gebildet wird. Nach der Erreichung der Kapazität, wo sich diese Funktionen unterscheiden, gibt es je nach Höhe der Parameter eine gewisse Steilheit der Kurve. Aus den Ergebnissen der Parameterschätzung von SAE 4, die in dieser Arbeit vorliegen, kann man eine gewisse Abflachung der Funktionen nach der Auslastungsgrenze sehen, aber man ist noch sehr weit entfernt, um die simulierten Datenpunkte genau mit diesen Funktionen abzubilden. Das hochautomatisierte Fahren erzeugt im gestauten Bereich keine Datenpunkte mehr, da sich die Fahrzeuge ab der Erreichung einer gewissen Auslastung in einem homogenen Verkehrsfluss wiederfinden. Dies führt dazu, dass zwar die Geschwindigkeit kurzzeitig gedrosselt wird, aber diese ab einem gewissen Zeitpunkt konstant gehalten wird. Deshalb sieht man bei der Reisezeit, dass bis zu einem Auslastungsgrad die Datenpunkte sich gleich verhalten wie bei SAE 0, aber sich diese dann bei einer Reisezeit

einpendeln und diese nicht mehr überschreitet. Diese Tatsache ist konträr zu den Eigenschaften einer CR - Funktion und deshalb ist es zur Zeit sehr schwierig passende Funktionen zu finden, um das hochautomatisierte Fahren und dessen Reisezeit abzubilden. Der Vergleich der verkehrlichen Kenngrößen, die im makroskopischen Verkehrsmodell ermittelt wurden, zeigen größtenteils positive aber auch teils negative Wirkungen des hochautomatisierten Fahrens. Nicht nur das LOS, das zur Klassifizierung der Auslastung herangezogen wird, wird verbessert, sondern es sind auch gleichzeitig reduzierte Reisezeiten zu sehen. Exemplarisch hierfür wird die Strecke von Graz nach Wien zur Morgenspitze herangezogen, wo die Reduktion der Reisezeit bei ca. 12 min liegt. Aber auch an den weiteren Stunden, die im Zuge dieser Arbeit untersucht wurden, ist diese positive Auswirkung auf die Reisezeit zu erkennen. Ein negativer Aspekt, der durch die Erhöhung der Kapazität einhergeht, ist, dass die Fahrleistung dadurch gesteigert wird. Durch die höhere Aufnahmefähigkeit der Straßen, bevor die Leistungsfähigkeit erreicht wird, kommt es auch bei den Fahrzeugkilometern auf dem A+S - Netz zu höheren Werten. Beispielhaft gibt es in Wien eine Erhöhung der Fahrzeugkilometer pro Tag von rund 30%.

In Zukunft wird es wichtig sein, weitere Analysen von mehreren Szenarien durchzuführen. Hierbei spielt der Mischverkehr mit unterschiedlichen SAE - Levels eine wichtige Rolle. Da man sich in der vorgelegten Arbeit nur mit einer 100%-igen Penetrationsrate für die jeweiligen SAE - Levels beschäftigt hat, kann man dies nicht so leicht auf die zukünftige Situation auf den österreichischen Autobahnen umlegen. Es werden nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig den selben Automatisierungsgrad erreichen und deshalb müssen auch diese Szenarien berücksichtigt werden. Diese Analysen werden zur Zeit auch schon im Zuge des Projekts VEGAS durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- [1] Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (2015): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, Springer Open, Berlin.
- [2] SAE International (2014): Verfügbar unter:www.sae.org/autodrive (Zugriff am: Juni 2016)
- [3] Shladover S., Nowakowski C., Lu X., Ferlis R. (2014): *Cooperative Adaptive Cruise Control Definitions And Operating Concepts*, California.
- [4] Schick, P. (2003): *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*; Eigenverlag Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart
- [5] Childress S., Nichols B., Charlton B., Coe S. (2014): *Using an activity-based model to explore possible impacts of automated vehicles*, Veröffentlicht für das 93te jährliche Meeting vom Transportation Research Board.
- [6] Tientrakool P., Ho Y., Maxemchuk N. (2011): *Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance*, New York.
- [7] Busch, F., Vortisch, P., Krause S., Motamedidehkordi N., Hartmann M. (2017): *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*, Berlin.
- [8] Patel R., Levin M., Boyles S.(2016): *Effects of autonomous vehicle behavior on arterial and freeway networks*. Veröffentlicht für das 95te jährliche Meeting vom Transportation Research Board.
- [9] Bundesrepublik Deutschland (1934): *Straßen-Verkehrsordnung: StVO Fassung: 18.September 2017*.
- [10] Klieman L., Zhang W., Bernardin V., Livshits V. (2011): *Estimation and Comparison of Volume Delay Functions for Arterials and Freeway HOV and General Purpose Lanes*. Veröffentlicht für das 90te jährliche Meeting vom Transportation Research Board.
- [11] Spiess, H. (1989): *Conical Volume-Delay Functions*. In: *Transportation Science*, Vol. 24, No. 2, Aegerten (Schweiz)
- [12] Akçelik R.(1991): *Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, Its Time-Dependent Form and an Alternative Travel Time Function*. In: *Australian Road Research*, Vol. 21, No. 3, Australien.

- [13] PTV Group (2015): *PTV Visum 15 Handbuch*, Karlsruhe.
- [14] Friedrich, M.(2000): *Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik*, Aachen
- [15] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2012): *RVS 03.01.11: Beurteilung des Verkehrsablaufs auf Straßen*, Wien.
- [16] Neuhold, R. (2017): *Schätzung von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen anhand empirischer Verkehrsdaten*
- [17] Ponzlet M.: *Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen*, Bochum, 1996
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*, Köln
- [19] Stevens R., Barkley A., Miller J. (2017): *Impact of site-specific data on the accuracy of volume delay functions*, TRB, Virginia
- [20] ASFINAG: <http://www.asfinag.at/verkehrssicherheit/bauen/bauprojekte/> (Zugriff am: April 2017)
- [21] Backhaus K., Erichson B., Plinke W., Weiber R. (2010): *Multivariate Analysemethoden*, 13. Auflage, Berlin.
- [22] Organ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Straßenverkehrstechnik* (Ausgabe 12.2011)
- [23] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2016): *Österreich unterwegs 2013/2014*, Wien

Anhang

Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Länge [km]	Fahrstreifen	Kapazität [Fzg/h]	V0 [km/h]
0	A 1F 100	256	123	1	2000	100
1	A 2F 80 Cl 1	32	8	2	5300	85
2	A 2F 80 Cl 2	169	27	2	5300	85
3	A 2F Berg	16	12	2	4000	120
4	A 2F 80 Cl 3	35	9	2	5300	85
5	A 2F 80 Cl 4	147	35	2	5300	85
6	A 2F 100 Cl 1	278	131	2	4400	100
7	A2F Berg 100	122	52	2	4000	80
8	A 2F 100 Cl 2	104	25	2	4400	100
9	A 2F 100 Cl 3	303	135	2	4400	100
10	A 2F 100 Cl 4	780	432	2	4400	100
11	A 2F 130 Cl 1	715	334	2	5000	120
12	R 2FS 95	152	29	2	1800	95
13	R 2FS 80	6	1	2	1600	80
14	R 2FS 60	487	85	2	1600	60
15	R 1FS 80	418	84	1	1100	80
16	R 1FS 60	3770	665	1	900	60
17	R 1FS 40	177	18	1	700	40
18	A 2F 130 Cl 2	136	37	2	5000	120
19	A 2F 130 Cl 3	716	341	2	5000	120
20	A 2F 130 Cl 4	5231	2194	2	5000	120
21	A 3F 80 Cl 1	26	5	3	7300	85
22	A 3F 80 Cl 2	97	19	3	7300	85
23	A 3F 80 Cl 3	27	5	3	7300	85

Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Länge [km]	Fahrstreifen	Kapazität [Fzg/h]	V0 [km/h]
24	A 3F 80 Cl 4	79	14	3	7300	85
25	A 3F 100 Cl 1	82	31	3	7000	100
26	A 3F 100 Cl 2	14	5	3	7000	100
27	A 3F 100 Cl 3	80	29	3	7000	100
28	A 3F 100 Cl 4	98	31	3	7000	100
29	A 3F 130 Cl 1	405	157	3	6600	120
30	A 3F 130 Cl 2	99	17	3	6600	120
31	A 3F 130 Cl 3	362	146	3	6600	120
32	A 3F 130 Cl 4	811	331	3	6600	120
33	A 4F 80 Cl 1	21	4	4	10000	85
34	A 4F 80 Cl 2	114	18	4	10000	85
35	A 4F 80 Cl 3	22	4	4	10000	85
36	A 4F 80 Cl 4	6	1	4	10000	85
37	A 4F 130 Cl 1	55	18	4	9000	120
38	A 4F 130 Cl 2	0	0	4	9000	120
39	A 4F 130 Cl 3	48	18	4	9000	120
40	A 4F 130 Cl 4	0	0	4	9000	120

Tabelle 6.1: Streckentypen unterschieden in Parametern

V_0 [km/h]	SV [%]	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4
		2-streifig [Fzg/h]	2-streifig [Fzg/h]	3-streifig [Fzg/h]	3-streifig [Fzg/h]	4-streifig [Fzg/h]	4-streifig [Fzg/h]
130	15	3 131	3 915	4 471	5 593	5 963	7 521
	10	3 147	3 933	4 488	5 365	6 062	7 820
	5	3 181	4 015	4 495	5 556	6 072	8 007
100	15	3 162	3 943	4 502	5 776	5 987	7 790
	10	3 169	3 938	4 519	5 790	5 985	7 942
	5	3 175	4 024	4 529	5 874	5 998	7 967
80	15	3 165	3 990	4 676	5 968	6 259	7 932
	10	3 156	3 945	4 673	5 997	6 235	8 112
	5	3 215	3 995	4 721	6 201	6 247	8 346

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Kapazitätsauswertung für freie Strecken

Geschw. [km/h]	SV [%]	G- Stufen	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4
			2+1RE [Fzg/h]	2+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]
130	15	1-2	2 049	1 977	1 988	2 334	2 955	3 046
		3-4	2 224	2 542	2 302	2 720	3 135	3 291
		5-6	2 558	3 103	2 767	3 063	3 097	3 502
	10	1-2	1 987	1 983	1 935	2 260	3 019	3 094
		3-4	2 254	2 652	2 346	2 718	3 124	3 420
		5-6	2 581	3 113	2 825	3 158	3 192	3 528
	5	1-2	2 005	2 042	2 055	2 395	3 054	3 193
		3-4	2 270	2 567	2 423	2 785	3 199	3 483
		5-6	2 603	3 128	2 926	3 283	3 180	3 565
100	15	1-2	2 049	2 012	2 292	2 423	2 966	3 009
		3-4	2 224	2 491	2 410	2 805	3 110	3 338
		5-6	2 583	3 082	2 759	3 091	3 138	3 562
	10	1-2	2 043	1 996	2 281	2 332	3 034	3 027
		3-4	2 244	2 506	2 479	2 825	3 188	3 426
		5-6	2 599	3 176	2 798	3 101	3 211	3 645
	5	1-2	1 985	2 053	2 326	2 377	3 113	3 091

Geschw. [km/h]	SV [%]	G- Stufen	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4
			2+1RE [Fzg/h]	2+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]
80		3-4	2 265	2 578	2 506	2 734	3 222	3 524
		5-6	2 686	2 989	2 897	3 360	3 192	3 680
	15	1-2	2 008	2 078	2 309	2 315	3 032	3 044
		3-4	2 245	2 546	2 463	2 785	3 204	3 488
		5-6	2 737	3 088	2 945	3 239	3 195	3 743
	10	1-2	2 008	1 958	2 332	2 156	3 075	3 074
		3-4	2 264	2 490	2 479	2 764	3 295	3 528
		5-6	2 626	3 069	2 955	3 277	3 242	3 743
	5	1-2	1 999	1 952	2 292	2 267	3 067	3 130
		3-4	2 295	2 525	2 562	2 759	3 201	3 607
		5-6	2 739	3 045	3 034	2 982	3 244	3 742

Tabelle 6.3: Kapazitäten MQ „Beginn Verflechtung“

Geschw. [km/h]	SV [%]	G- Stufen	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4
			2+1RE [Fzg/h]	2+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]
130	15	1-2	2 515	2 776	1 724	2 269	1 963	1 957
		3-4	2 678	3 019	2 172	2 810	2 525	2 723
		5-6	2 773	3 262	2 733	3 164	2 856	3 122
	10	1-2	2 565	2 802	1 944	2 316	1 984	2 020
		3-4	2 682	3 008	2 205	4 682	2 845	2 685
		5-6	2 744	3 295	2 750	4 954	2 987	3 142
	5	1-2	2 717	2 830	1 826	2 411	1 972	2 006
		3-4	2 836	3 101	2 318	2 907	2 523	2 797
		5-6	2 793	3 330	2 793	3 142	2 881	3 254
	15	1-2	2 562	2 750	1 949	2 122	1 970	2 067
		3-4	2 647	2 989	2 280	2 782	2 479	2 701
		5-6	2 724	3 211	2 740	3 097	2 878	3 210
100	10	1-2	2 597	2 776	2 031	2 349	1 992	2 024
		3-4	2 730	3 060	2 336	3 015	2 509	2 759

Geschw. [km/h]	SV [%]	G- Stufen	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4	SAE 0	SAE 4
			2+1RE [Fzg/h]	2+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	3+1RE [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]	2-1RA [Fzg/h]
80	5	5-6	2 819	3 271	2 759	3 130	2 914	3 300
		1-2	2 719	2 819	2 081	2 359	1 994	2 094
		3-4	2 853	3 023	2 458	2 891	2 516	2 849
		5-6	2 906	3 285	2 814	3 329	2 896	3 392
	15	1-2	2 639	2 687	2 273	2 458	2 105	2 101
		3-4	2 728	3 060	2 337	2 879	2 559	2 844
		5-6	2 825	3 222	2 917	3 154	2 917	3 427
	10	1-2	2 653	2 732	2 081	2 285	2 156	2 181
		3-4	2 697	2 999	2 366	2 887	2 589	2 854
		5-6	2 819	3 249	2 933	3 167	2 989	3 417
	5	1-2	2 744	2 772	2 142	2 231	2 111	2 100
		3-4	2 764	3 057	2 417	2 858	2 570	2 895
5-6		2 887	3 242	2 948	3 246	2 958	3 399	

Tabelle 6.4: Kapazitäten MQ „Ende Verflechtung“

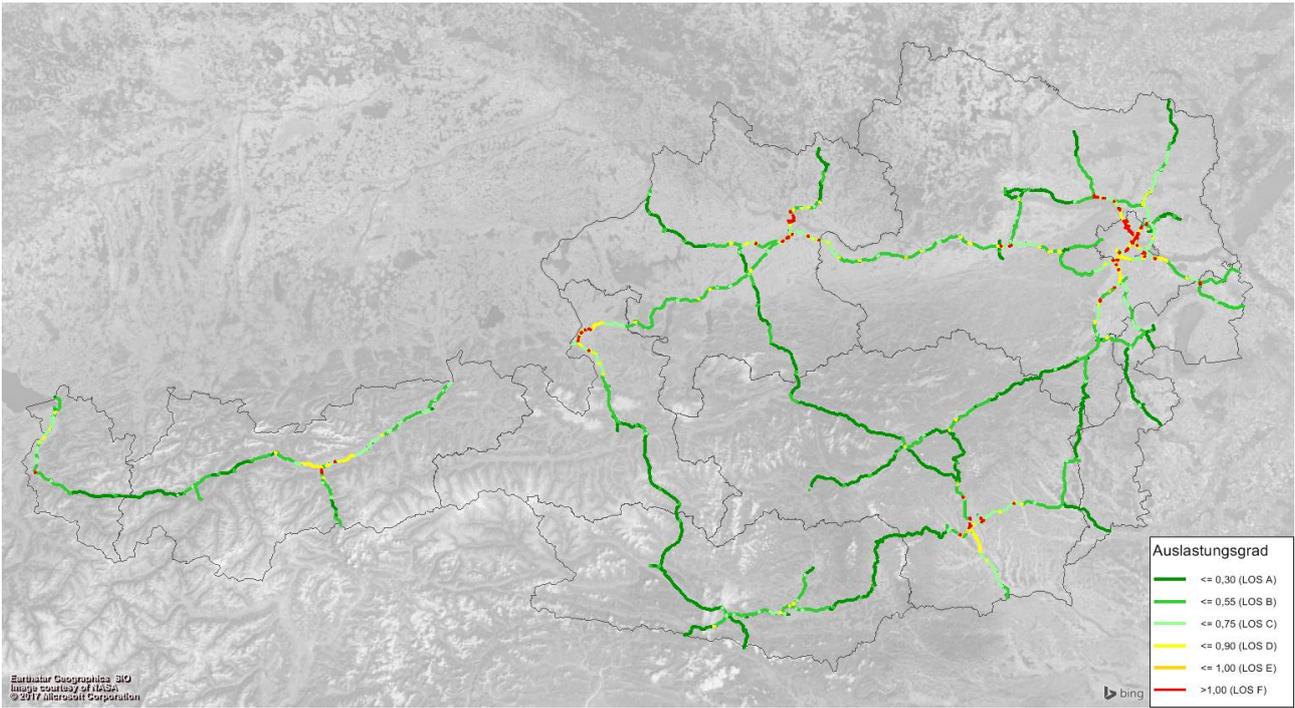


Abbildung 6.1: Auslastungsgrad: SAE 0 von 17:00 bis 18:00

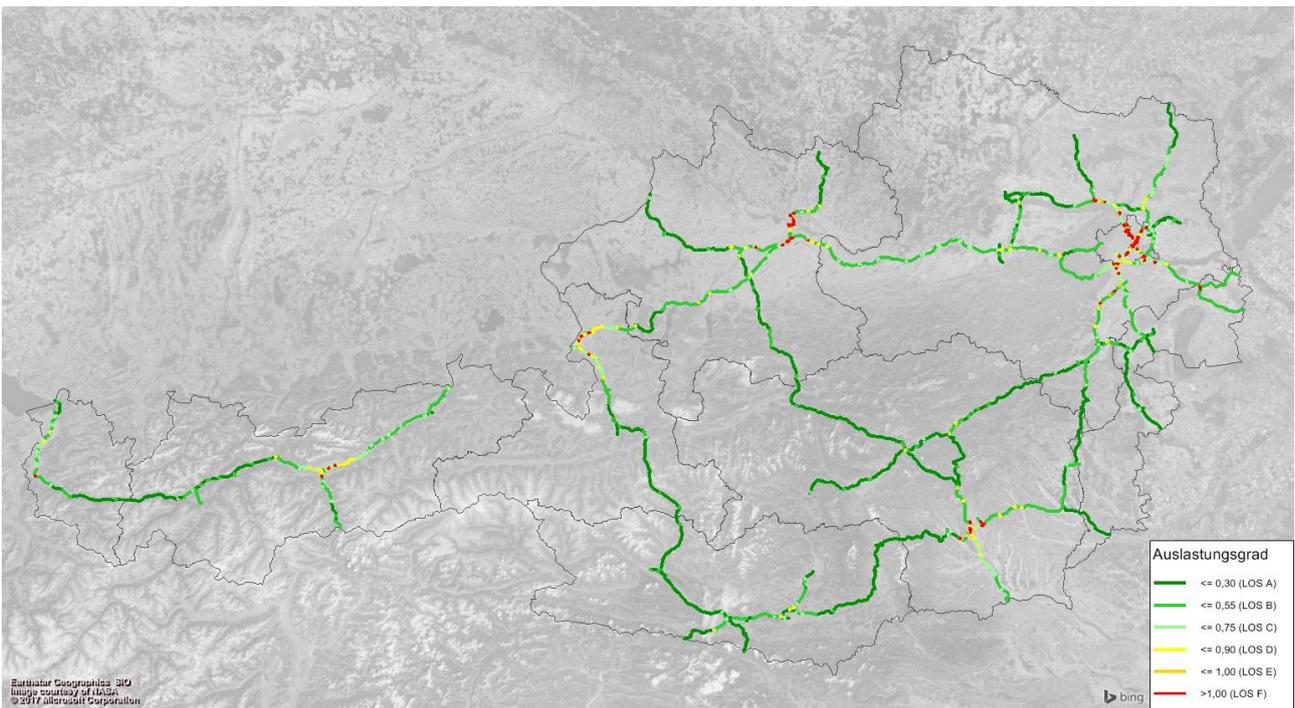


Abbildung 6.2: Auslastungsgrad: SAE 4 von 17:00 bis 18:00

SAE 0	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	7 660	5 580	2 074	793	178	336
Länge [km]	2 692	2 084	648	170	36	52
Anteil	46,1%	33,6%	12,5%	4,7%	1,1%	2,0%
SAE 4						
Anzahl Strecken	8 898	5 331	1 493	447	128	324
Länge [km]	3 239	1 904	377	90	24	47
Anteil	53,5%	32,1%	9,0%	2,7%	0,8%	1,9%

Tabelle 6.5: Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (17:00 bis 18:00)

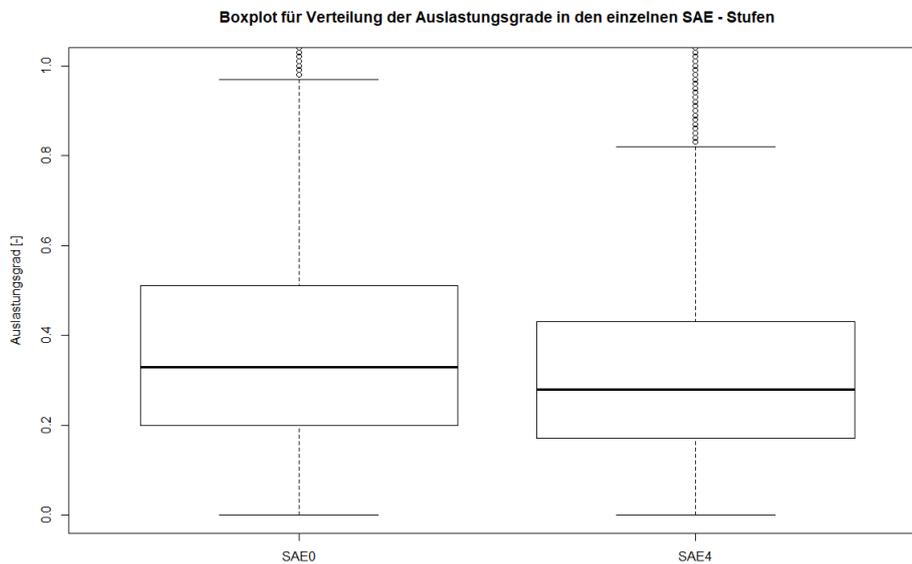


Abbildung 6.3: Boxplot (17:00 Uhr bis 18:00 Uhr)

	Reisezeit (SAE 0)	Reisezeit (SAE 4)
	[min]	[min]
Graz - Wien (I. Innere Stadt)	138	138
Eisenstadt - Bregenz	483	473
Innsbruck - Linz	226	212
Salzburg - Wien	219	207
Graz - Innsbruck	316	309

Tabelle 6.6: Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 17:00 bis 18:00

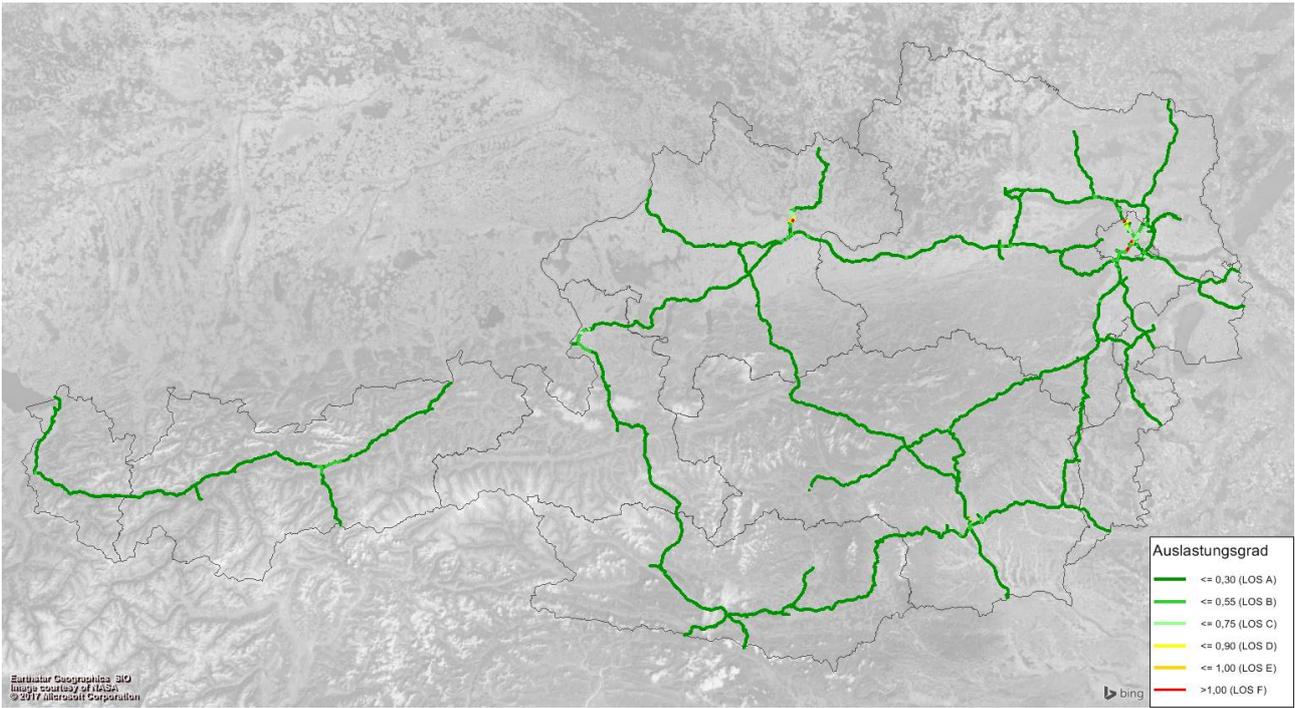


Abbildung 6.4: Auslastungsgrad: SAE 0 von 21:00 bis 22:00

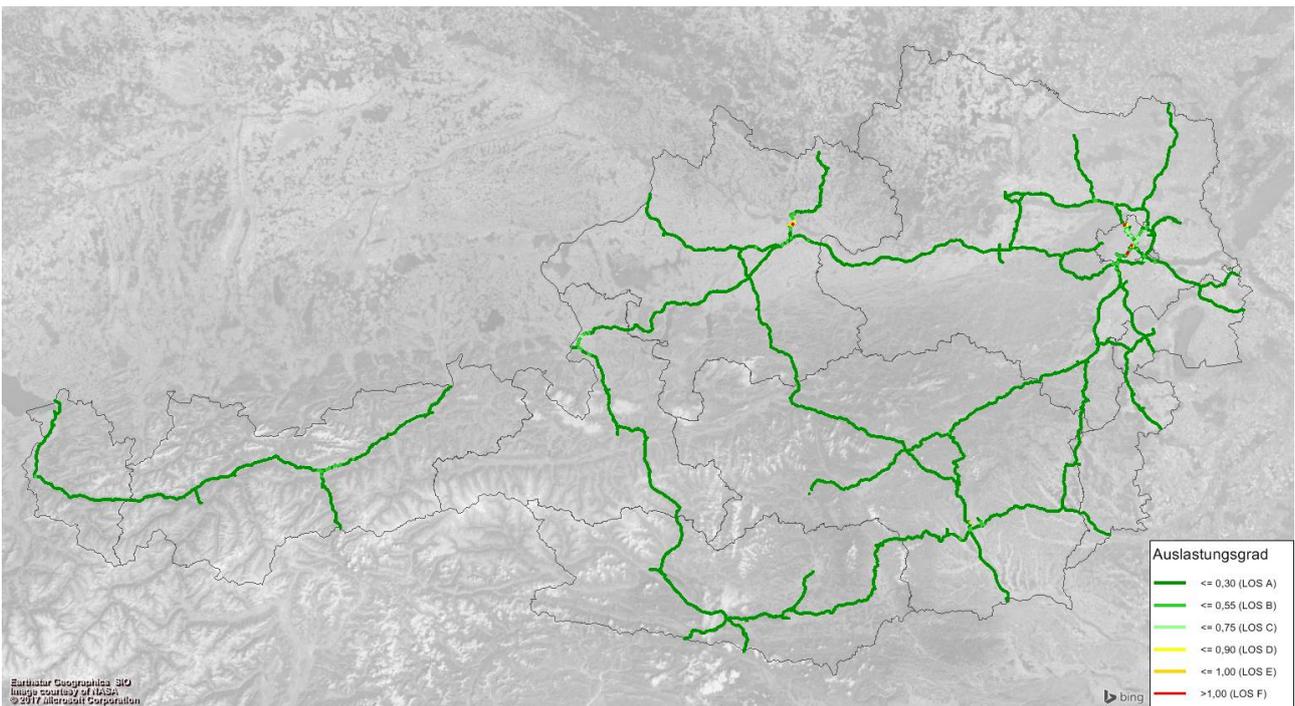


Abbildung 6.5: Auslastungsgrad: SAE 4 von 21:00 bis 22:00

SAE 0	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	15 877	614	104	12	3	11
Länge [km]	5 551	111	14	3	< 1	1
Anteil	95,5%	3,7%	0,6%	< 0,1%	< 0,1%	< 0,1%

SAE 4	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E	LOS F
Anzahl Strecken	16 074	465	58	10	3	11
Länge [km]	5 591	79	7	2	< 1	1
Anteil	96,7%	2,8%	0,3%	< 0,1%	< 0,1%	< 0,1%

Tabelle 6.7: Verteilung der LOS - Stufen im A+S - Netz Österreich (21:00 bis 22:00)

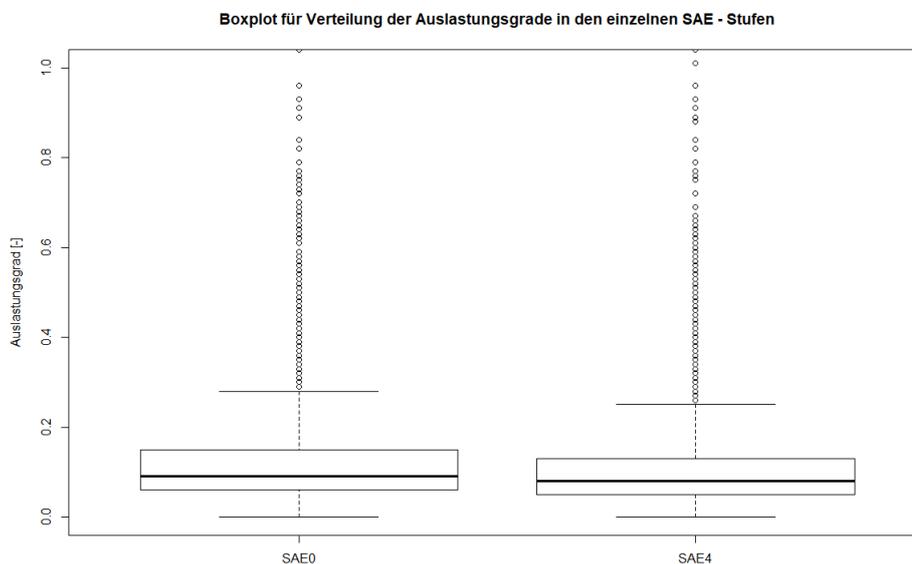


Abbildung 6.6: Boxplot (21:00 Uhr bis 22:00 Uhr)

	Reisezeit (SAE 0)	Reisezeit (SAE 4)
	[min]	[min]
Graz - Wien (I. Innere Stadt)	133	134
Eisenstadt - Bregenz	436	436
Innsbruck - Linz	199	199
Salzburg - Wien	197	197
Graz - Innsbruck	305	305

Tabelle 6.8: Reisezeitenänderung bestimmter Strecken von 21:00 bis 22:00