



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Modellierung und Leistungsfähigkeitsbetrachtung von autonomen Fahrzeugen in gemischten Verkehrsnetzen

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Elisabeth Lepka, BSc.

bei

Univ. Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, am 22.März 2015

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.

Graz, _____

Elisabeth Lepka, 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.

Graz, _____

Elisabeth Lepka, BSc.

Danksagung

Der erste und größte Dank gebührt meiner Mama, die unabhängig von Zeit und Situation, möge sie auch noch so unüberwindbar erscheinen, immer an mich glaubt und mich zu dem Menschen erzogen hat, der ich heute bin. Ein riesen Dank geht auch an den Rest meiner Familie: Papa, Oma, Godi und Christian, die mich nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern immer für mich da sind und mir stets Rückhalt geben.

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf für ein innovatives und spannendes Masterarbeitsthema, sowie für die Betreuung während der Bearbeitung.

Weiters bedanke ich mich bei Robert, der mir während der gesamten Masterarbeitszeit mit kompetenten Ratschlägen und Lösungsansätzen behilflich war.

Ein sehr wichtiger Faktor in meinem Leben sind meine Freunde, bei denen ich mich sehr herzlich bedanken möchte:

Weit vor meinem Studium kennengelernt, haben mich Agi, Christoph und Robi durch mein Leben begleitet und sind zu wichtigen Menschen geworden.

Ein Bachelorstudium ohne Bianca, Julia und Rosi, mit denen ich nicht nur das Studium meisterte, sondern auch meine Freizeit verbringe, wäre unvorstellbar gewesen.

Durch die Fv Bau, in der ich zwei Jahre aktiv mitwirken durfte, konnte ich viel Erfahrung mit ehrenamtlichen Tätigkeiten sammeln.

Mit Nathan gewann der Begriff Lebensgenuss für mich eine neue Bedeutung und eine unkomplizierte Freundschaft wie diese, übersteht auch immer wieder große Distanzen.

Die im Masterstudium entstandene "Burgerrunde" sorgt für abwechslungsreiche und lustige Abende. Zwei wunderbare Mädls – Jacky und Tina – die immer ein offenes Ohr für mich haben und auf die man sich verlassen kann, sind mir besonders ans Herz gewachsen.

Joschi, Manfred und Stef wurden durch gemeinsame Vorlesungen und Projekte sowie Freizeitaktivitäten zu guten Freunden.

Lisa – die tollste Berlinerin, trat vor zwei Jahren in mein Leben und wurde schon nach kürzester Zeit zu einer Seelenverwandten, die mich versteht und mir Rückhalt gibt, komme was wolle.

Während der Zeit der Masterarbeit sorgte besonders Mighty für die wichtigen Pausen zwischendurch.

Mit Alex, Karli und Leo habe ich in den letzten Monaten viel gemeinsame Zeit auf der Uni verbracht und das gegenseitige Aufbauen und Füreinander da sein in den Up's and Down's unserer Masterarbeiten macht unsere Freundschaft unvergesslich.

Durch das Zusammenspiel all dieser und noch weiterer, hier namentlich nicht genannter, Personen wurde mein Studium zu einer wunderbaren und bedeutenden Zeit – Danke euch allen!

**Aufgabenstellung für die Masterarbeit
von Elisabeth Lepka**

Graz, 04.06.2014

**Modellierung und Leistungsfähigkeitsbetrachtung von autonomen Fahrzeugen in gemischten
Verkehrsnetzen**

Problemstellung

Aufgrund des stetig steigenden Verkehrsaufkommens im städtischen Bereich, welches längerfristig gesehen zu Kapazitätsproblemen führt, werden Themen wie Sicherheit, Umweltverträglichkeit und vor allem Effizienz immer mehr Bedeutung zugewiesen. Um die Kapazität des Verkehrsflusses zu steigern, entstand schon in den 1950er Jahren die Idee von autonom fahrenden Fahrzeugen, welche das menschliche Fahrverhalten und die damit einhergehenden kapazitätsreduzierenden Faktoren ausschalten. Die Umsetzung erfolgte in Form von sogenannten PRT-Systemen (Personal Rapid Transit), bei denen autonome Fahrzeuge auf separaten, niveaufreien, aufgeständerten Fahrwegen verkehren (z.B. Flughafen London-Heathrow). Die extrem hohen Infrastrukturkosten sowie die städtebaulichen Anforderungen machen die Erstellung solcher Systeme in europäischen Mittel- und Großstädten jedoch nicht möglich. Eine alternative Lösung dieses Problems ist die Kapazitätssteigerung durch vollständige Automatisierung.

Am Institut für Straßen- und Verkehrswesen wird derzeit ein Forschungsprojekt unter dem Akronym „AVESTRA“ (*Analyse von autonomen Verkehrssystemen im städtischen Raum*) in Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug“ (ViF) bearbeitet, indem die Idee verfolgt wird die Vorteile des MIV (Wahlfreiheit bezüglich Zeit, Quell- und Zielort) und des ÖPNV (Hohe Effizienz, Kapazität und Sicherheit bei gleichzeitig niedrigen Emissionen) zu verknüpfen. Dabei wird untersucht, wie sich autonome Fahrzeuge mit dem heutigen Stand der Technik auf niveaufreien als auch niveaugleichen Netzen verhalten.

Die Masterarbeit ist als Teil dieses Forschungsprojektes zu sehen. In dieser Arbeit soll mithilfe einer mikroskopischen Verkehrssimulation eine Leistungsfähigkeitsabschätzung autonomer Systeme im Vergleich zum konventionellen, motorisierten Individualverkehr für ein Teilnetz durchgeführt werden. Ein weiteres Ziel ist die Ermittlung von Widerstandsfunktionen (Reisezeit in Abhängigkeit der Auslastung) für unterschiedliche Streckentypen.

Aufgabenstellung

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Masterarbeit; Abweichungen sind mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung möglich:

- Literaturrecherche über die bereits vorhandenen Systeme autonomer Fahrzeuge und deren Infrastruktur
- Mikrosimulation eines Teilnetzes von Singapur mit unterschiedlichen Streckentypen (Primär, Sekundär, Tertiär), auf welchem sich sogenannte Podcars am primären und sekundären Netz bewegen mit anschließender Leistungsfähigkeitsanalyse zur Ermittlung der streckentypfeinen Kapazität; das für autonom fahrende Fahrzeuge technische Know-How wird vom ViF zur Verfügung gestellt und in die Mikrosimulation implementiert (Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigung, Annäherungsverhalten, etc.)
- Netzkalibrieren: Variantenuntersuchungen zu Haltestellenabstand und -anordnung sowie Netzgestaltung (Fahrtrichtung, Rampenhäufigkeit und -gestaltung)
- Im Zweiten Schritt der Mikrosimulation sollen sich zusätzlich zu den Podcars auch auf Bestandsstraßen (tertiäres Netz) zugelassene, autonom fahrende Fahrzeuge bewegen. Bestimmung der Leistungsfähigkeit je Streckentyp (optimaler Haltestellenabstand und Netzgestaltung werden aus dem vergangenen Simulationsschritt übernommen).
- Schätzung von streckentypfeinen Widerstandsfunktionen (Reisezeit in Abhängigkeit der Auslastung) für autonome/gemischte Verkehrsnetze mittels Regressionsanalyse

Für die Anfertigung der Masterarbeit wird die Verkehrsflusssoftware VISSIM sowie Verkehrsmodellldaten zur Verfügung gestellt. Bereitgestellte Modelldaten dürfen ausschließlich zur Anfertigung der Masterarbeit genutzt werden.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Masterarbeitstext, Präsentationen sowie allen Analyse- und Simulationsdaten ist beizulegen.

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

Tel. 0316 873 6220

martin.fellendorf@tugraz.at

Betreuer

Dipl.-Ing. Robert Neuhold

Tel. 0316 873 6724

robert.neuhold@tugraz.at

Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Modellierung und Leistungsfähigkeitsbetrachtung von autonomen Fahrzeugen in gemischten Verkehrsnetzen

106 Seiten, 83 Abbildungen, 37 Tabellen

Durch die Forschung und Entwicklung von Fahrzeugen in Richtung fahrerloser (autonomer) Fortbewegung, erwartet man sich in Zukunft eine deutliche Kapazitätssteigerung im Straßenverkehr. Diese Masterarbeit untersucht – mithilfe von mikroskopischen (VISSIM) und makroskopischen (VISUM) Verkehrsmodellprogrammen – die Auswirkung der automatisierten Fahrzeugtechnik und dem damit einhergehenden Entfall des menschlichen Fahrverhaltens auf die Kapazität unterschiedlicher Streckentypen.

Zuerst wurden autonome Fahrzeuge mit deren Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten definiert. Anschließend wurde der Einfluss der Fahrverhaltensparameter auf freier Strecke sowie auf Einmündungen mit und ohne Verflechtungsbereich (Teilnetze) getestet und in weiterer Folge die mögliche Leistungsfähigkeit der Strecken ermittelt. Diese kann im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen um bis zu 73% gesteigert werden. Auch der Einfluss unterschiedlicher Zuflussstärken von Strecken mit Einmündungen wird in dieser Arbeit aufgezeigt.

Als nächster Schritt erfolgte die Modellierung eines fiktiven Gesamtnetzes, welche einen Teil des Straßennetzes von Singapur darstellt. Hier wurden die Ergebnisse der Kapazitätsanalyse der Teilnetze eingepflegt. Das Gesamtnetz beinhaltet die drei Streckentypen *Primär*, *Sekundär* und *Tertiär*, auf welchen Fahrzeuge mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verkehren. Am Gesamtnetz wurden Untersuchungen hinsichtlich der Reisezeit und -distanz durchgeführt, sowie der Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte ermittelt. Auswertungen des Gesamtnetzes und einzelner Knotenpunkte zeigen auf, dass bei gleichen Bedingungen durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge um bis zu 50% höhere Verkehrsstärken möglich sind.

Diese Arbeit belegt das hohe Potential autonomer Fahrzeuge hinsichtlich der Leistungssteigerung und weist die positive Auswirkung auf den Verkehrsfluss nach.

Abstract

Modeling and analysing capacity of autonomous vehicles in mixed transportation networks

106 pages, 83 figures, 37 tables

Due to current research and development in the field of driverless (autonomous) transportation a rising capacity of road traffic can be expected in the future. This thesis investigates – with the aid of microscopic (VISSIM) and macroscopic (VISUM) traffic simulation programmes – the effect of autonomous vehicle technology on the capacity of different route types. In this case human driving behaviour does not apply any more.

First of all special acceleration- and deceleration behaviours of autonomous vehicles were defined. Besides the influence of driving behaviour was tested in three separated section networks: a free lane, a merging lane without a weaving section and a merging lane with a weaving section. This study shows that the capacity of autonomous vehicles can be increased by up to 73% compared to conventional vehicles. Furthermore the impact of different input flows on merging lanes is illustrated.

The next step was to develop a model of a fictive, complete network – representing a part of Singapore's actual network – for which the results of the capacity analyses in the section network have been used. Within this network, vehicles can drive at certain speeds depending on the type of lane they are using. These are primary, secondary and tertiary lanes. Throughout this complete network the total travel distance, the total travel time as well as the traffic flow and the traffic density have been determined. Traffic volume analyses of the entire network and two selected intersections reveal an increase of up to 50% by using autonomous vehicles.

This thesis verifies the high potential of autonomous vehicles concerning efficiency and traffic flow.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	v
Abkürzungen.....	vi
1 Einleitung und Aufbau der Arbeit.....	1
I. Recherche.....	2
2 Automatisierung von Fahrzeugen.....	2
2.1 Definition automatisierter Fahrzeuge.....	2
2.2 Autonome Fahrzeuge und deren Infrastruktur.....	3
2.2.1 Selbstfahrende Fahrzeuge des Individualverkehrs.....	4
2.2.2 ÖV – ähnliche Fahrzeugsysteme (AGT).....	7
3 Verkehrsfluss und Kapazität.....	14
3.1 Definition der Kapazität.....	16
3.2 Ermittlung der Kapazität.....	16
3.2.1 Richtlinien und Vorschriften.....	17
3.2.2 Empirische Ermittlung.....	18
3.2.3 Mikroskopische Verkehrsmodelle.....	20
3.3 Kapazitätsbeschränkungsfunktion (CR-Funktion).....	20
3.4 Geschwindigkeitsverteilung.....	22
4 Modellierung des Fahrverhaltens in VISSIM.....	24
4.1 Fahrzeugfolgeverhalten.....	24
4.2 Fahrstreifenwechselerhalten.....	27
II. Methodik und Auswertung.....	29
5 Methodische Vorgehensweise.....	29
5.1 Modellbasierte Leistungsfähigkeitsbetrachtung.....	29
5.2 Definition der Fahrzeugtypen.....	30
5.2.1 Funktionen der autonomen Fahrzeugtypen.....	32
6 Leistungsfähigkeitsanalyse am Teilnetz.....	34
6.1 Beschreibung der Teilnetze.....	34
6.1.1 Teilnetz 1 – freie Strecke.....	34
6.1.2 Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtungsbereich.....	35
6.1.3 Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtungsbereich.....	36
6.2 Parameterstudie.....	36

6.2.1	Analyse Teilnetz 1.....	37
6.2.2	Analyse Teilnetz 2.....	39
6.2.3	Analyse Teilnetz 3.....	40
6.3	Kapazität auf freier Strecke	40
6.4	Kapazität bei Einmündungen ohne Verflechtungsbereich	43
6.4.1	Erweiterte Auswertungen im q-v-Diagramm (Teilnetz 2)	58
6.5	Kapazität bei Einmündungen mit Verflechtungsbereich.....	62
6.5.1	Erweiterte Auswertungen im q-v-Diagramm (Teilnetz 3)	66
6.6	Vergleich der Einmündungen mit und ohne Verflechtungsbereich.....	68
7	Leistungsfähigkeitsanalyse am Gesamtnetz	70
7.1	Grundstruktur des Gesamtnetzes	70
7.2	Aufbau eines makroskopischen Netzes.....	71
7.2.1	Streckentypen	71
7.2.2	Geometrie Knotenpunkte	73
7.2.3	Bezirke und deren Anbindungen.....	74
7.2.4	Haltestellen und ÖV-Linien	75
7.2.5	Nachfrage	78
7.3	Ergebnisse der makroskopischen Netzanalyse	79
7.3.1	Haltestellen	79
7.3.2	Auslastung des Netzes.....	80
7.3.3	Geschwindigkeitsverteilung im Netz.....	83
7.4	Aufbau eines mikroskopischen Netzes.....	84
7.4.1	Haltestellen	84
7.4.2	Knotenpunkte.....	86
7.5	Auswertungen der mikroskopischen Simulation.....	87
7.5.1	Gesamtnetz	88
7.5.2	Knoten	93
8	Schlussfolgerungen.....	97
8.1	Zusammenfassung.....	97
8.2	Fazit und Ausblick	98
	Literaturverzeichnis.....	99
	Anhang	104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Level der Fahrzeugautomatisierung	2
Abbildung 2: Googles selbstfahrendes Auto – Lexus [Urmson, 2014-1].....	5
Abbildung 3: Prototyp autonomes Fahrzeug von Google [Google, 2014-2]	5
Abbildung 4: Volvo – Drive me [Spiegel, 2014]	6
Abbildung 5: Audi A7 – selbstfahrendes Auto [Futurezone, 2015].....	6
Abbildung 6: Englands fahrerloses Fahrzeug – LUTZ Pathfinder [Kwon, 2015]	7
Abbildung 7: Ultra Pods am Flughafen Heathrow [Ultra Global PRT, 2013]	9
Abbildung 8: Morgantown, PRT – Netz [Raney & Young, 2004]	9
Abbildung 9: MPM Minibus [PRT Consulting, 2009]	10
Abbildung 10: Zielauswahl und Bezahlung [PRT Consulting, 2009]	10
Abbildung 11: Station Tower, Morgantown [Raney & Young, 2004].....	11
Abbildung 12: PRT in Suncheon, Südkorea [Posco, 2014].....	12
Abbildung 13: Podcar in Masdar City [2getthere, 2012]	13
Abbildung 14: Fundamentaldiagramm einer vierstreifigen Autobahn [Geistefeldt, 2007]	15
Abbildung 15: Vergleich der konstanten mit der stochastischen Kapazität [Brilon, 2004]	19
Abbildung 16: CR-Funktionstyp BPR für $\alpha = 0,5$ [Fellendorf, 2013]	21
Abbildung 17: Geschwindigkeitsverteilung [Geistefeldt, 2007].....	23
Abbildung 18: Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann [VISSIM, 2014]	24
Abbildung 19: Notwendiger Fahrstreifenwechsel.....	27
Abbildung 20: Methodik der Leistungsfähigkeitsermittlung autonomer Fahrzeuge	29
Abbildung 21: Aufteilung der Fahrzeugklassen des Mischsystems.....	31
Abbildung 22: Maximalbeschleunigung autonomer Fahrzeuge und Podcars	32
Abbildung 23: Beschleunigungen und Verzögerungen automatisierter Fahrzeuge	33
Abbildung 24: Teilnetz 1 – freie Strecke.....	35
Abbildung 25: Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtungsbereich.....	35
Abbildung 26: Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtungsbereich.....	36
Abbildung 27: Kapazität in Abhängigkeit der Geschwindigkeit auf freier Strecke.....	42
Abbildung 28: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h	46
Abbildung 29: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h	47
Abbildung 30: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 65$ km/h	47
Abbildung 31: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h	48
Abbildung 32: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80$ km/h, $q_N = 50$ km/h.....	49
Abbildung 33: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80$ km/h, $q_N = 60$ km/h.....	50
Abbildung 34: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80$ km/h, $q_N = 70$ km/h.....	51
Abbildung 35: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h.....	52
Abbildung 36: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h.....	53
Abbildung 37: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h.....	54
Abbildung 38: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h	55
Abbildung 39: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h	55
Abbildung 40: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h	56
Abbildung 41: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Autonomes Fahrzeug 4.....	57
Abbildung 42: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Konventionelles Fahrzeug	57

Abbildung 43: q-v Verlauf für autonome Fahrzeuge 4 (Teilnetz 2).....	61
Abbildung 44: q-v Verlauf für konventionelle Fahrzeuge (Teilnetz 2)	62
Abbildung 45: Schematische Darstellung Einmündung mit Verflechtung (Teilnetz 3)	62
Abbildung 46: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 30$ km/h.....	64
Abbildung 47: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 50$ km/h.....	65
Abbildung 48: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80$ km/h.....	66
Abbildung 49: q-v Verlauf für autonome Fahrzeuge 4 (Teilnetz 3).....	68
Abbildung 50: Vergleich der Kapazität mit und ohne Verflechtungsbereich.....	69
Abbildung 51: Singapur mit Eingrenzung des bearbeiteten Netzausschnittes [Google Maps, 2015] ...	70
Abbildung 52: Gesamtnetz abgebildet in Visum (Teil von Singapur)	72
Abbildung 53: Darstellung Knotenpunkt Sekundär/Sekundär	73
Abbildung 54: Ausbildung einer Rampe im Schnittbereich sekundär/sekundär	74
Abbildung 55: Ausbildung einer Kurve im Schnittbereich sekundär/sekundär	74
Abbildung 56: Bezirke und Anbindungen.....	75
Abbildung 57: Startpunkte der Linienrouten je Linie	76
Abbildung 58: Linienroute A1, A2 und A3	76
Abbildung 59: Linienroute B1, B2, B3 und B4	77
Abbildung 60: Linienroute C1, C2 und C3.....	77
Abbildung 61: Bezirke von Singapur [URA, 2014]	78
Abbildung 62: Durchschnittliches Aussteigeverhalten pro Haltestelle.....	80
Abbildung 63: Auslastung IV+ÖV im Gesamtnetz (100% Nachfrage)	81
Abbildung 64: Auslastung IV+ÖV im Gesamtnetz (50% Nachfrage).....	82
Abbildung 65: Geschwindigkeiten im Gesamtnetz (100% Nachfrage).....	83
Abbildung 66: Geschwindigkeiten im Gesamtnetz (50% Nachfrage).....	84
Abbildung 67: Zweistreifige Haltebucht.....	85
Abbildung 68: Exemplarische Knotenpunkte	86
Abbildung 69: Kreuzungspunkt von zwei sekundären Strecken	87
Abbildung 70: Mittlere Geschwindigkeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge	90
Abbildung 71: Anzahl der autonomen und konventionellen Fahrzeuge im Gesamtnetz	90
Abbildung 72: Gesamtwegstrecke autonomer und konventioneller Fahrzeuge	90
Abbildung 73: Mittlere Verkehrsstärke autonomer und konventioneller Fahrzeuge	91
Abbildung 74: Gesamtreisezeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge	91
Abbildung 75: Mittlere Verkehrsdichte autonomer und konventioneller Fahrzeuge	91
Abbildung 76: Gesamtverlustzeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge.....	92
Abbildung 77: Knotenpunkt Nr. 1 und Nr.2	93
Abbildung 78: Teilnetz 2 – aut5 \triangleq pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h	104
Abbildung 79: Teilnetz 2 – aut5 \triangleq pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h	104
Abbildung 80: Teilnetz 2 – aut5 \triangleq pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h	105
Abbildung 81: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h	105
Abbildung 82: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h	106
Abbildung 83: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Technische Daten der Ultra Pods am Flughafen Heathrow	8
Tabelle 3.1: Kapazitäten laut [RVS 03.01.11, 2012]	17
Tabelle 3.2: Kapazitäten laut [HBS, 2001]	18
Tabelle 4.1: Parameter Fahrzeugfolgeverhalten Wiedemann 99 [VISSIM, 2014]	26
Tabelle 4.2: Weitere Folgeverhaltensparameter	27
Tabelle 4.3: Fahrstreifenwechselfparameter	28
Tabelle 5.1: Definierte Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen	31
Tabelle 6.1: Folgeparameter Teilnetz 1 – freie Strecke.....	37
Tabelle 6.2: Parameterstudie Teilnetz 1 – freie Strecke	38
Tabelle 6.3: Differenz der Verkehrsstärke bei Änderung des zeitlichen Folgeabstands (CC1)	38
Tabelle 6.4: Folgeparameter Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtung	39
Tabelle 6.5: Parameterstudie Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtung	39
Tabelle 6.6: Parameterstudie Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtung	40
Tabelle 6.7: Kapazität auf freier Strecke bei 30, 50 und 80 km/h	41
Tabelle 6.8: Kapazitätssteigerung auf freier Strecke.....	42
Tabelle 6.9: Anzahl der Fahrzeuge je Simulationsstunde und Geschwindigkeit.....	44
Tabelle 6.10: Minimum der Gesamtkapazität je Geschwindigkeit	51
Tabelle 6.11: Kapazitätssteigerung bei Strecken mit Einmündung ohne Verflechtungsbereich	58
Tabelle 6.12: Verhältnis der Verkehrsstärke – autonomes Fahrzeug Typ 4.....	59
Tabelle 6.13: Verhältnis der Verkehrsstärke – konventionelles Fahrzeug	60
Tabelle 6.14: Anzahl der Fahrzeuge je Simulationsstunde und Geschwindigkeit für $q_H:q_N$ -Diagramme.....	63
Tabelle 6.15: Verhältnis der Verkehrsstärke je Simulationsstunde und Geschwindigkeit (aut4).....	67
Tabelle 6.16: Vergleich der Kapazität mit und ohne Verflechtungsbereich.....	69
Tabelle 7.1: Kapazitäten bei $q_H:q_N = 2:1$	71
Tabelle 7.2: Streckentypen im Gesamtnetz	72
Tabelle 7.3: Durchschnittliche Anzahl der Sitze autonomer Fahrzeuge	79
Tabelle 7.4: Aussteigeranteil pro Linie und Route	86
Tabelle 7.5: Simulationsläufe	87
Tabelle 7.6: Vergleich der autonomen Fahrzeuge bei unterschiedlicher Nachfrage.....	89
Tabelle 7.7: Vergleich der konventionellen Fahrzeuge bei unterschiedlicher Nachfrage	89
Tabelle 7.8: Anteil der Verlustzeit an der Reisezeit	92
Tabelle 7.9: Vergleich der Verkehrsstärken autonomer und konventioneller Fahrzeuge	92
Tabelle 7.10: Ergebnisse Knotenpunkt 1 – Einmündungsbereich a	94
Tabelle 7.11: Ergebnisse Knotenpunkt 1 – Einmündungsbereich b.....	94
Tabelle 7.12: Ergebnisse Knotenpunkt 2 – Einmündungsbereich a	95
Tabelle 7.13: Ergebnisse Knotenpunkt 2 – Einmündungsbereich b.....	95
Tabelle 7.14: Verkehrsstärke autonomer und konventioneller Fahrzeuge im Vergleich	96

Abkürzungen

AGT	Automated Guideway Transit
APM	Automated People Mover
aut	Autonomes Fahrzeug
FSV	Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr
GRT	Group Rapid Transit
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
IV	Individualverkehr
konv	Konventionelles Fahrzeug
OSM	Open Street Map
ÖV	Öffentlicher Verkehr
pod	Podcar
PRT	Personal Rapid Transit
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SV	Schwerverkehr
TTD	Total Travel Distance (Gesamte Fahrzeugkilometer im Netz)
TTT	Total Travel Time (Gesamte Reisezeit im Netz)
V2I	Vehicle to Infrastructur
V2V	Vehicle to Vehicle

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit

Das stetig steigende Verkehrsaufkommen im städtischen Bereich und die damit verbundene Verschlechterung des Verkehrsflusses stellen Themen wie Sicherheit, Umweltverträglichkeit und vor allem Effizienz immer weiter in den Vordergrund. Viele dieser Probleme könnten durch automatisiertes Fahren gelöst werden und die weltweite Motivation um die Forschung in diesem Bereich voranzutreiben ist aufgrund weiterer, zahlreicher Faktoren sehr groß. Einerseits kann durch die Reduktion des menschlichen Eingreifens in das Fahrverhalten die Sicherheit im Straßenverkehr gesteigert und Unfälle durch Unachtsamkeit oder hohe Reaktionszeiten vermieden werden. Des Weiteren ist ein zeiteffizientes Fahren von einer gewünschten Startposition zu einer Destination durch untereinander kommunizierende Systeme wie „Vehicle to Vehicle“ (V2V) und „Vehicle to Infrastruktur“ (V2I) möglich, um so Staus zu vermeiden. Die Steigerung der Effizienz durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge, welcher in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden soll, erfolgt aufgrund geringer Sicherheits- und Folgeabstände. Dieser optimierte Verkehrsfluss führt wiederum zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauches und der Emission umweltschädlicher Stoffe. Außerdem erhöht das fahrerlose Fahren die Mobilität im Alter und kann auch von Menschen mit Behinderung bedient und genutzt werden.

Durch die gemeinschaftliche Nutzung von Fahrzeugen wie es bei Carsharing-Systemen der Fall ist, können auch Probleme wie der Mangel an Parkplätzen und unnötige Leerlaufzeiten von Fahrzeugen gelöst werden. Eine Studie in San Francisco zeigt auf, dass nur etwa 11% aller vorhandenen PKWs über den Tag verteilt genutzt werden, den Rest der Zeit verbringen diese Fahrzeuge parkend. In Spitzenstunden steigt dieser Wert auf nur etwa 16% an. [Alessandrini et al., 2013]

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen Streckentypen durch die Automatisierung von Fahrzeugen sowohl im Individualverkehr (IV) als auch im öffentlichen Verkehr (ÖV) zu ermitteln. Es werden sogenannte Podcars (als ÖV) und autonome Fahrzeuge (als IV) untersucht, wobei nicht ausgeschlossen werden soll, dass diese autonomen Fahrzeuge als Carsharing-Fahrzeuge verwendet werden. Das wäre gerade bei selbstfahrenden Autos vorstellbar, da diese zum Beispiel per Handyapp angefordert werden könnten und so eine hohe Flexibilität gewährleisten würden. Außerdem bietet diese Variante aufgrund des Fahrens von Haustür zu Haustür einen hohen Komfort wie bei einem eigenen Pkw, nur mit dem Vorteil der entfallenden Parkplatzsuche.

Die Masterarbeit unterteilt sich in zwei Teile – *Recherche* und *Methodik und Auswertung*. Der erste Teil gibt einen Überblick über bereits vorhandene, autonome Verkehrssysteme sowie Definition und Einteilung selbstfahrender Fahrzeuge. Außerdem sind in diesem Kapitel Grundlagen der Leistungsfähigkeit und des allgemeinen Fahrverhaltens von Fahrzeugen zu finden.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet die Vorgehensweise, Methodik sowie Ergebnisse der Leistungsfähigkeitsanalyse autonomer Fahrzeuge. Dies geschieht in zwei Stufen. Zuerst werden an drei Teilnetzen Fahrverhaltensparameter hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Verkehrsfluss untersucht und die Kapazität ermittelt. Diese Erkenntnisse werden anschließend in einem Gesamtnetz eingepflegt und dort Analysen bezüglich des Verkehrsflusses sowie der Verkehrsdichte durchgeführt.

Abschließend folgen eine Zusammenfassung der Arbeit, ein Fazit sowie ein Ausblick für zukünftige Forschungsprojekte.

I. Recherche

2 Automatisierung von Fahrzeugen

Die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) in Washington beschreibt, dass automatisierte Fahrzeuge mehr Sicherheit bieten, Unfälle vermeiden, weniger Kraftstoff durch überlegtes Fahren verbrauchen und dadurch die Umwelt schonen. Die NHTSA fördert die Forschung in Richtung automatisierter Fahrzeuge und deren Infrastruktur und beschäftigt sich mit der Definition unterschiedlicher Automatisierungsgrade. [NHTSA, 2013]

Die Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach beschreibt, dass etwa 90% der Unfälle auf menschliches Fehl- und Fahrverhalten zurückzuführen sind und diese durch Automatisierung gesenkt werden können. [Gasser, 2012]

2.1 Definition automatisierter Fahrzeuge

Automatisierte Fahrzeuge sind jene, welche sicherheitsbezogene Kontrollfunktionen übernehmen können (zB. Lenken, Beschleunigen, Bremsen), die ohne direktes Eingreifen des Lenkers stattfinden. Fahrzeuge welche nur Sicherheitswarnungen anzeigen, selbst aber keine Funktionsmechanismen durchführen, werden nicht als automatisierte Fahrzeuge bezeichnet. Solche automatisierten Fahrzeuge verwenden Sensoren, Kameras, GPS und Telekommunikation um Informationen über die Umgebung zu erhalten. In sicherheitsbedenklichen Situationen kann dann in das Geschehen eingegriffen werden. Um dies genauer zu klassifizieren hat die NHTSA (2013) fünf Stufen der Automatisierung von Fahrzeugen deklariert. In Anlehnung an die NHTSA hat auch die BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ [Gasser, 2012] fünf Automatisierungsgrade (siehe Abbildung 1) definiert, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.



Abbildung 1: Level der Fahrzeugautomatisierung

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Definition der Automatisierungsgrade nicht als abgeschlossen angesehen werden soll.

Level 0 – Keine Automatisierung/Driver only

Der Fahrer hat während der gesamten Fahrt die komplette Kontrolle über die primären Fahrfunktionen wie Bremsen, Beschleunigen und Lenken des Fahrzeuges und muss die Umgebung überwachen und alle Funktionen selbst ausführen. Fahrzeuge mit unterstützenden Systemen, welche nicht die Kontrolle übernehmen oder eingreifen, werden der Automatisierungsstufe 0 zugewiesen. Dazu zählen Warnsysteme wie etwa die Kollisionswarnung und die Erkennung von Objekten im toten Winkel.

Level 1 – Funktionsspezifische Automatisierung/Assistiert

Dieser Automatisierungsgrad beinhaltet einen oder mehrere eingreifende Kontrollfunktionen, jedoch arbeitet jede automatisierte Funktion unabhängig voneinander. Der Fahrzeughenker kann primäre Fahrfunktionen dem Fahrzeug überlassen, wie zum Beispiel beim ACC (Adaptive Cruise Control – Adaptive Geschwindigkeitsregelung), bei dem ein Fahrzeug einem anderen folgt und dabei einen gewissen Abstand einhält. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dass das Fahrzeug automatisch Funktionen übernimmt, wie beim ESC/ESP (Electronic Stability Control – Elektronisches Stabilitätsprogramm), bei welchem durch das Bremsen einzelner Räder verhindert wird, dass das Fahrzeug ausbricht. Das Fahrzeug übernimmt entweder Führungskontrolle oder Beschleunigung bzw. Bremsung, aber niemals beides. Die BAST-Projektgruppe beschreibt dies als Quer- und Längsführung. Zu dieser Kategorie zählt unter anderem der automatische Parkassistent, welcher die Querführung (Lenken) übernimmt. Beschleunigen und verzögern (Längsführung) muss der Fahrer jedoch selbst.

Das System muss vom Fahrzeughenker immer überwacht werden und wenn eine automatisierte Funktion aktiv ist, so muss er auch jederzeit bereit sein, in das Geschehen eingreifen zu können.

Level 2 – Kombinierte Funktionsautomatisierung/Teilautomatisiert

Im Automatisierungsgrad zwei, der Teilautomatisierung, kann das System zwei primäre Kontrollfunktionen für einen bestimmten Zeitraum oder eine Situation übernehmen und den Fahrer von diesen Funktionen entlasten. Wie auch in Level 1 muss der Fahrer diese Funktionen immer überwachen und jederzeit zum Eingreifen bereit sein, denn das System kann ohne Vorwarnung seine Kontrolle wieder an den Fahrer abgeben. Ein Beispiel für die in Level zwei beinhalteten Fahrzeuge sind jene, welche die adaptive Geschwindigkeitsregelung mit der Spurhaltung kombinieren können, also eine automatische Längs- und Querführung übernehmen.

Level 3 – Limitierte Selbstfahrautomatisierung/Hochautomatisiert

Automatisierungslevel 3 ermöglicht es dem Fahrer, die Kontrolle aller sicherheitsrelevanten Funktionen unter bestimmten Bedingungen (zB. Streckentyp, Witterung und Geschwindigkeit) an das Fahrzeug abzugeben. Ändern sich diese Bedingungen so warnt das System den Fahrer und dieser muss wieder selbst die Kontrolle über diese Funktionen übernehmen. Der Fahrzeughenker muss also das System und die Umgebung nicht ständig überwachen, aber bereit sein, nach Aufforderung, das Fahrzeug wieder selbst zu steuern. Ein Beispiel dafür bietet der Autobahnchauffeur, welcher die automatische Längs- und Querführung ohne weitere Überwachung durch den Fahrer auf Autobahnen bis zu einer gewissen Geschwindigkeit übernimmt.

Level 4 – Selbstfahrautomatisierung/Vollautomatisiert – Autonomes Fahren

Der Fahrer hat die Aufgabe die gewünschte Destination anzugeben, übernimmt aber während der Fahrt dorthin keinerlei Kontroll- und Ausführungsfunktionen und muss zu keinem Zeitpunkt in das Verkehrsgeschehen eingreifen. Im Folgenden wird dieses Level der Automatisierung als „autonom“ und die darin enthaltenen Fahrzeuge als „autonome Fahrzeuge“ bezeichnet.

2.2 Autonome Fahrzeuge und deren Infrastruktur

Im folgenden Kapitel werden bereits existierende selbstfahrende Fahrzeuge wie beispielsweise das bekannte Google Car (Fahrzeug des Individualverkehrs) und einige AGT – Systeme (Fahrzeuge des

öffentlichen Verkehrs), welche auf Flughäfen aber auch in Städten verwendet werden, sowie deren notwendige Infrastruktur, aufgezeigt und vorgestellt.

2.2.1 Selbstfahrende Fahrzeuge des Individualverkehrs

Google ist einer der Vorreiter wenn es um selbstfahrende bzw. automatisierte Fahrzeuge geht, wobei teilweise immer noch Personen im Fahrzeug anwesend sein und im Falle einer Überforderung der automatisierten Fahrfunktionen eingreifen müssen, jedoch gibt es auch schon Versuche mit komplett selbst fahrenden Autos, also autonomen Fahrzeugen. Die gesetzliche Regelung hierzu fehlt vor allem in Europa noch. In den USA wurden autonome Fahrzeuge gesetzlich bereits in einigen Bundesstaaten wie Kalifornien, Nevada und Florida zugelassen. Im Folgenden sind einige weitere autonome bzw. selbstfahrende Fahrzeuge, welche unter anderem von der Automobilindustrie und Universitäten entwickelt und getestet wurden, beschrieben.

Googles selbstfahrende Autos

Im Jahre 2008 startete Google das Projekt „self-driving car“ zuerst mit Toyota Prius und später mit Lexus SUVs. [Gibbs, 2014]

2009 verzeichnete Google bereits über 100.000 Meilen (ca. 161.000 km) an Testfahrten auf den Highways von Kalifornien, 2011 waren es bereits 160.000 Meilen (ca. 257.000 km) automatisierten Fahrens mit eingeschränkter menschlicher Unterstützung. Die Fahrzeuge sind mit Sensoren (Radar und Laser) ausgestattet, welche eine dreidimensionale Echtzeitabbildung der Umgebung erzeugen. Googles Software teilt diese Informationen in vier Kategorien ein: bewegtes Auto, Fußgänger, Radfahrer und statische Objekte wie Signale, parkende Autos und Randsteine. Die Software, welche das autonome Fahren ermöglicht, nennt sich „Google Chauffeur“. [Google, 2014-1]

Über ein Dutzend Fahrzeuge haben bis zum August 2012 300.000 Testmeilen unterschiedlichster Fahr- und Verkehrsbedingungen hinter sich gebracht und dies unfallfrei. Allerdings sitzt bis zu diesem Zeitpunkt immer noch ein Mensch hinter dem Steuer, um im Falle einer Unterbrechung des selbstfahrenden Modus eingreifen zu können. [Urmson, 2012]

Die Zahl der automatisiert gefahrenen Teststrecken steigt immer weiter an und im April 2014 waren es schon 700.000 Meilen. Zu diesen gehören jetzt auch schon Strecken in der Stadt, denn bisher wurde das System meist auf Autobahnen getestet. In der Stadt begegnen dem Fahrzeug viel mehr unerwartete Szenarien und Situationen wie zum Beispiel das plötzliche Auftauchen eines Fahrzeugs aus einer unübersichtlichen Einmündung oder ein Fußgänger, welcher bei Rot über die Ampel geht. [Urmson, 2014-1]

In Abbildung 2 ist ein selbstfahrendes Google Auto in einer städtischen Umgebung zu sehen.

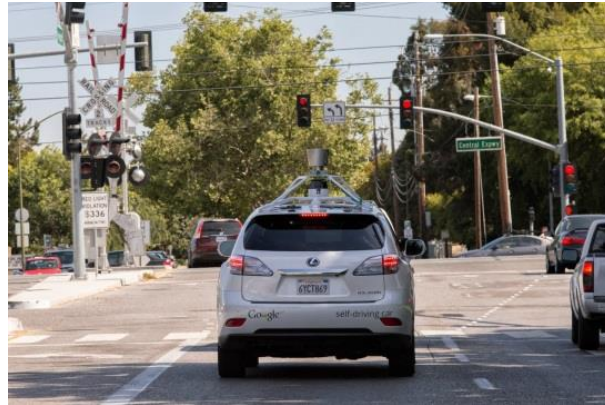


Abbildung 2: Googles selbstfahrendes Auto – Lexus [Urmson, 2014-1]

Im Mai 2014 präsentierte Google ein Modell eines autonomen Fahrzeuges, welches weder über ein Lenkrad noch Pedale, sondern ausschließlich über einen Start- und einen Notausbutton, verfügt. Diese sollen vervielfältigt werden, um Testfahrten in Kalifornien durchführen zu können. [Urmson, 2014-2]

In Abbildung 3 sieht man den ersten Prototypen dieses autonomen Fahrzeuges, welches im Dezember 2014 vorgestellt wurde. Dieses Fahrzeug ist als Elektroauto ausgeführt und besitzt zwei Sitze. [Google, 2014-2]



Abbildung 3: Prototyp autonomes Fahrzeug von Google [Google, 2014-2]

Es kann zwei Personen ohne jede weitere Interaktion der Insassen befördern. Mithilfe einer Smartphone-App wird die gewünschte Destination angegeben und somit eines dieser autonomen Fahrzeuge angefordert. Steht das Fahrzeug zum Abfahren bereit, muss nur noch der Startbutton gedrückt werden. Auf einem kleinen Display wird das Wetter, die aktuelle Reisegeschwindigkeit und ein Countdown bis zum Ziel angezeigt. Das Fahrzeug besitzt eine Reichweite von etwa 100 Meilen (ca. 160 km) und kann sich mit einer Geschwindigkeit von 25 mph (40 km/h) fortbewegen. Durch Kameras, Radar- und Lasersensoren nimmt das Fahrzeug seine Umgebung in einem Winkel von 360° wahr. [Gibbs, 2014]

Drive me - Volvo

Auf einem ausgewählten Streckennetz in und um Göteborg in Schweden verkehren seit 2014 auf rund 50 Kilometern Volvos selbstfahrende Fahrzeuge. Für 2017 wird geplant, 100 solcher Fahrzeuge auf diesen Strecken verkehren zu lassen. Dieses Projekt findet in Zusammenarbeit mit der Volvo Car

Group, der schwedischen Verkehrsbehörde, dem schwedischen Verkehrsamt, dem Lindholmen Science Park sowie der Stadt Göteborg statt. [Volvo Car Group, 2014]



Abbildung 4: Volvo – Drive me [Spiegel, 2014]

Jack - Audi

Audi entwickelte für das automatisierte Fahren den sogenannten Autopiloten „Jack“. Das Fahrzeug verfügt über Sensoren und Videokameras, mit denen es die Umgebung sondiert und wahrnimmt. Im städtischen Bereich gibt es noch öfter Probleme und der Fahrzeughlenker muss das Steuer selbst wieder übernehmen. Sollte der Fahrer trotz Aufforderung das Lenken des Fahrzeuges nicht übernehmen, so fährt das Fahrzeug in einem Zustand minimalen Risikos weiter und bleibt schlussendlich am Fahrbahnrand stehen. Der Autopilot Jack funktioniert auf Autobahnen schon sehr gut. [Meyer, 2015-1]



Abbildung 5: Audi A7 – selbstfahrendes Auto [Futurezone, 2015]

Der erste Langstreckentest erfolgte im Jänner 2015 von Stanford (Kalifornien) bis Las Vegas (Nevada). Die Strecke betrug über 550 Meilen und der Test konnte ohne weitere Probleme durchgeführt und abgeschlossen werden. [Meyer, 2015-2]

LUTZ Pathfinder – RDM Group

Das erste autonome Fahrzeug in Großbritannien nennt sich „LUTZ Pathfinder“ und wurde von der RDM Group konstruiert. Es handelt sich hierbei um einen Zweisitzer mit 19 Sensoren (Panoramakameras, Lasertechnik und Radar). Im Fahrzeug befinden sich zwei Monitore, einer für das Anzeigen der Route und einer zur Unterhaltung. Das Fahrzeug ist mit 15 mph (etwa 24 km/h) unterwegs, sein Akku hält etwa 8 Stunden und er kann bis zu 40 Meilen (ca. 64 km) weit fahren. Der LUTZ Pathfinder soll auf den Bürgersteigen verkehren und noch dieses Jahr in Milton Keynes getestet werden. [Kwon, 2015]



Abbildung 6: Englands fahrerloses Fahrzeug – LUTZ Pathfinder [Kwon, 2015]

Hongqi HQ3

Der Hongqi HQ3 wurde in China von der National University of Defense Technology entwickelt und 2011 vorgestellt. Er ist 175 Meilen auf dem Expressway von Changsha nach Wuha gefahren. Dieses Fahrzeug verfügt über kein GPS sondern nur über Videokameras und Radarsensoren. Das Problem bei diesem Fahrzeug sehen die Entwickler darin, dass aufgrund der Ausstattung mit nur einer Videokamera nur bei Tag und unter guten Wetterbedingungen gefahren werden kann. [Nosowitz, 2011]

Auch Nissan, Toyota, Mercedes-Benz und viele weitere Automobilhersteller sowie Forschungseinrichtungen arbeiten an fahrerlosen Systemen für Fahrzeuge, um in naher Zukunft die Fiktion in die Realität umzusetzen.

2.2.2 ÖV – ähnliche Fahrzeugsysteme (AGT)

Automated Guideway Transit (AGT) beschreibt einen Transporttyp für Personen und Frachten, welcher computerprogrammiert und fahrerlos arbeitet und Fahrzeuge auf separaten Wegen verkehren. Es gibt zwei Typen von AGT, das sind zum einen Personal Rapid Transit (PRT) und zum anderen Automated People Mover (APM), welche im Folgenden genauer vorgestellt und beschrieben werden. Die Beiden unterscheiden sich hauptsächlich in Größe und Geschwindigkeit der Fahrzeuge und an welchen Haltestellen diese halten. Group Rapid Transit (GRT) beschreibt einen weiteren autonomen Transporttyp des AGT und ist dem PRT sehr ähnlich. Der einzige Unterschied verzeichnet sich in der Größe der Fahrzeuge. [Juster, Schonfeld, 2014]

Personal Rapid Transit (PRT)

PRT (Personal Rapid Transit) ist ein öffentliches Transportsystem, welches die Vorteile des öffentlichen Verkehrs und des Individualverkehrs vereint. Auf speziell dafür gebauten Wegenetzen verkehren fahrerlose Fahrzeuge (sogenannte Podcars), in welchem etwa drei bis vier Personen Platz finden. Podcars können aber vereinzelt auch größer ausgeführt werden. Diese Podcars können an den dafür vorgesehenen Stationen gerufen werden und agieren wie Taxis indem sie auf direktem Weg zum Ziel fahren ohne dabei an anderen Stationen zu halten. In der Theorie sind PRT – Systeme vor allem ökologisch, kostengünstig und nutzerfreundlich. [Choromanski et al., 2013]

Automated People Mover (APM)

APM sind meist größere Fahrzeuge mit höheren Maximalgeschwindigkeiten als PRT, verkehren aber auch auf dafür vorgesehenen, separaten Wegen. Automated People Mover halten an jeder Haltestelle wie dies zum Beispiel bei einer Straßenbahn üblich ist. APM sind vor allem auf großen US-Flughäfen zu sehen. [Juster, Schonfeld, 2014]

Die Recherche zeigt, dass es viele Projekte mit Automated Guideway Transit gibt, diese jedoch eher klein und in einem abgeschlossenen Rahmen gehalten werden. Die nachfolgenden umgesetzten Projekte zeigen einen Überblick über Personal Rapid Transit, welche grob in drei Gruppen eingeteilt werden können:

- *Offener Fahrweg*: Die Fahrzeuge verfügen meist über straßentaugliche Räder und sind mit Batterie betrieben. Sie werden entweder auf der Strecke durch Magnete oder durch Lasersensoren, welche seitliche Abgrenzungen erkennen können, geführt.
- *Gebunden*: Hier sind die Fahrzeuge an einen Schienenweg gebunden und werden meist mit einem Induktionsmotor betrieben, welcher auch das Bremsen ermöglicht.
- *Hängend*: Dieser Typ eines PRT – Systems benutzt sogenannte T-Pods als Fahrzeuge, welche von der „Fahrbahn“ herunterhängen und aus Gründen der infrastrukturellen Bauweise recht leicht sein sollten.

[PRT Consulting, 2009]

Heathrow Airport – ULTra

Das PRT – System welches sich am Flughafen in Heathrow befindet und den Terminal 5 mit dem Business-Parkplatz verbindet, wurde von dem britischen Ingenieurbüro ULTra Global PRT (Urban Light Transit) entwickelt. Die Ultra Pods fahren mit gewöhnlichen Reifen, werden mit einer Batterie betrieben und es finden 4 bis 6 Personen darin Platz. In der folgenden Tabelle 2.1 werden die technischen Eckdaten eines solchen Ultra Pods aufgezeigt.

Tabelle 2.1: Technische Daten der Ultra Pods am Flughafen Heathrow

Gesamtgewicht	1300 kg
Leergewicht	850 kg
Max. Geschwindigkeit	40 km/h
Länge	3,7 m
Breite	1,5 m
Höhe	1,8 m
Passagiere	4-6
Dauerleistung	2 kW
Max. Verzögerung	3,5 m/s ²

Aufgrund ihrer geringen Länge haben die Ultra Pods einen Wenderadius von 5 Metern. Die gesamte Infrastruktur ist 3,9 km lang und es ist möglich an jeder Station etwa 100 bis 120 Fahrzeuge pro Stunde abzufertigen.



Abbildung 7: Ultra Pods am Flughafen Heathrow [Ultra Global PRT, 2013]

In 90% der Fälle kommt das angeforderte Fahrzeug innerhalb einer Minute, das heißt es gibt praktisch keine Wartezeiten. Nach dem Einsteigen drückt man den „Türschließ-“ und „Zielbutton“ und das Podcar setzt sich automatisch in Gang und fährt ohne Zwischenhalt zum Ziel. [Ultra Global PRT, 2013]

Morgantown, West Virginia

Die Universität West Virginias erbaute in den 1960iger Jahren einen neuen, etwa eine Meile vom bestehenden Hauptgebäude entfernten, Campus. Der anfängliche Transport mit Shuttlebussen musste aber aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens überdacht werden. Um ein AGT – System zu demonstrieren, wurde in den 1970iger Jahren der sogenannte MPM (Morgantown People Mover) konstruiert, der erste seiner Art in den USA. Da in den Minibussen etwa 21 Personen Platz finden (8 Sitz- und 13 Stehplätze) müsste der MPM eigentlich zu den GRT – Systemen (Group Rapid Transit) gezählt werden.

Wie in Abbildung 8 erkennbar, umfasst das Netzwerk des MPM 5 Stationen mit einer Gesamtlänge von 8,7 Meilen (entspricht etwa 14 km).

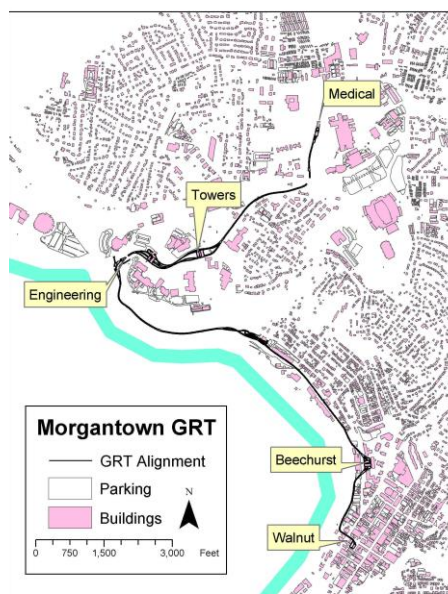


Abbildung 8: Morgantown, PRT – Netz [Raney & Young, 2004]

Die 71 Fahrzeuge auf diesem Netz verkehren mit gewöhnlichen Reifen, sind fahrerlos und werden elektrisch betrieben (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: MPM Minibus [PRT Consulting, 2009]

Es existieren drei Fahrmodi:

- Nachfragemodus
- Fahrplanmodus
- Umlaufmodus

Zu verkehrsreichen Zeiten wird entweder der Nachfrage- oder der Fahrplanmodus und zu verkehrsarmen Zeiten der Umlaufmodus aktiviert. Der Nachfragemodus besitzt zwei Parameter - die Wartezeit (max. 5 Minuten) und die Auslastung eines Fahrzeuges (mind. 15 Passagiere) - von welchen abhängt, wann ein Fahrzeug gerufen wird. Dazu müssen die Passagiere, bevor sie in die Station eintreten, ihre Destination auswählen (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Zielauswahl und Bezahlung [PRT Consulting, 2009]

In Perioden in denen die Nachfrage sehr hoch ist, wird der Fahrplanmodus aktiviert, welcher in dieser Situation wesentlich effizienter ist als der Nachfragemodus. Diese beiden Modi fahren immer nur Point to Point, d.h. es werden keine Zwischenstationen angefahren, welches das Hauptmerkmal

eines PRT – Systems darstellt. Die Zielstation jedes Fahrzeuges wird mittels einer elektronischen Anzeige bekanntgegeben.

Der Umlaufmodus hingegen funktioniert wie ein lokaler Bus und hält in jeder Station, um so einen effizienten Betrieb während verkehrsarmer Zeiten zu ermöglichen. Das heißt, eigentlich kann der MPM nicht genau einer Kategorie der AGT zugeordnet werden, sondern entspricht einem Mischsystem.

In Abbildung 11 kann man eine der mittleren Stationen (Towers) des Systems in Morgantown erkennen. „S“ steht für „switch“ und bedeutet, dass die Fahrbahn gewechselt, bzw. verlassen werden kann. Die mit „M“ (merge) gekennzeichneten Punkte sind Einfädelungspunkte und „CH“ steht für „channels“. In diesen Buchten können Fahrzeuge parken bzw. Personen aufnehmen und absetzen.

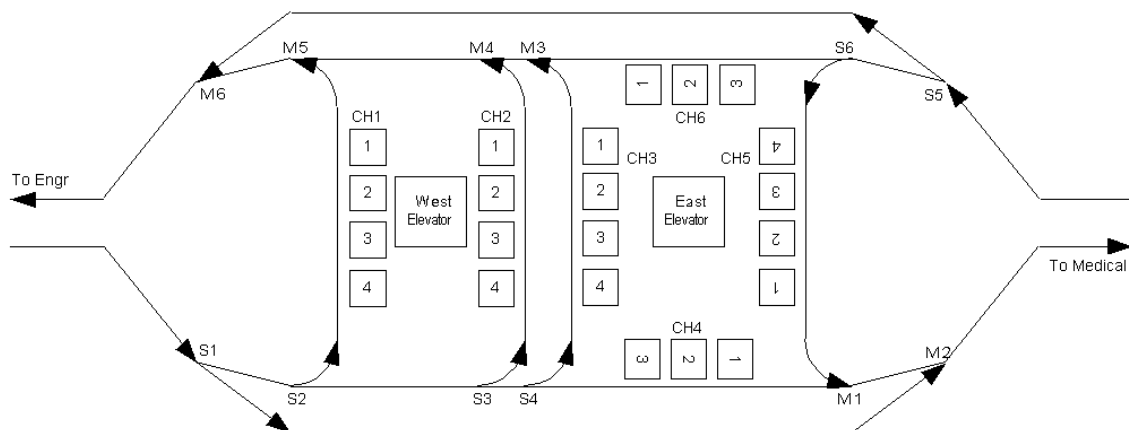


Abbildung 11: Station Tower, Morgantown [Raney & Young, 2004]

Um einen Point to Point Verkehr überhaupt ermöglichen zu können, wurden an den drei Mittelstationen Umkehrmöglichkeiten sowie Bypässe errichtet.

Mit diesem System können 15.000 Personen pro Tag transportiert werden, welches in etwa der Hälfte aller Einwohner von Morgantown entspricht. [Raney & Young, 2004]

Suncheon, Südkorea

Das PRT – System in Suncheon ist mit der Technologie von VECTUS ausgestattet und nennt sich SkyCube. Die Streckenlänge beträgt 4,6 Kilometer, führt durch den küstennahen Eco-Park in Suncheon Bay und es verkehren 40 Fahrzeuge auf diesem Schienennetz, welches in zwei Richtungen befahren werden kann. Vor dem Bau der Strecke in Suncheon wurden an einer 400 Meter langen Teststrecke in Uppsala, Schweden Voruntersuchungen an einem solchen PRT – System durchgeführt. SkyCube eröffnete im April 2013 seine Pforten und enthält auf der Strecke zwei Stationen. Eine Besonderheit sind die polyurethanummantelten Stahlreifen, welche eine Lärmreduktion bewirken sollen. [Vectus, 2012]



Abbildung 12: PRT in Suncheon, Südkorea [Posco, 2014]

Auf der Strecke in Suncheon können bis zu 1300 Personen pro Stunde befördert werden. Die Fahrzeuge verkehren hier mit einer Geschwindigkeit von 43 km/h und fahren in einem Abstand von 4 bis 5 Sekunden hintereinander her. Die Länge eines Podcars beträgt 3,5 Meter und die Breite etwa 1,9 Meter. Eine maximale Beschleunigung von 2 m/s^2 und eine maximale Verzögerung von bis zu 5 m/s^2 sind mit diesen Fahrzeugen möglich. Die Kapazität eines Fahrzeugs ist beschränkt auf 6 bis 9 Personen. [ATRA, 2013]

Demnach beträgt die Streckenkapazität 144 bis 217 Fahrzeuge pro Stunde.

Masdar City, Abu Dhabi

In Abu Dhabi soll eine Stadt errichtet werden, in der nur erneuerbare Energien zur Anwendung kommen und bis zu 40.000 Personen leben sollen. Diese Stadt nennt sich Masdar City und beinhaltet unter anderem ein PRT – System, das bereits im November 2010 in Betrieb genommen wurde. Auf einer Strecke von 1,7 Kilometern fahren 10 Fahrzeuge mit gewöhnlicher Bereifung und es gibt zwei Stationen, in denen Personen ein- und aussteigen können. Zum einen handelt es sich um eine Parkgarage und die andere Station befindet sich beim Institut für Wissenschaft und Technologie. Die Fahrzeit zwischen diesen Stationen beträgt 2 Minuten und der Transport ist 18 Stunden am Tag verfügbar. Das PRT in Masdar City wurde entwickelt von der Firma „2getthere“, welche ihren Sitz in Utrecht (Holland) hat.

In einem Fahrzeug finden bis zu 4 Personen Platz, es zeigt sich jedoch, dass der Besetzungsgrad im Schnitt zwischen 2,1 und 2,4 Personen pro Podcar liegt. Die eingebaute Lithium Ionen Batterie reicht für eine Strecke von etwa 60 Kilometern, welche mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h zurückgelegt wird. Der Mindestabstand der Fahrzeuge beträgt 5 Sekunden. [ATRA, 2013]



Abbildung 13: Podcar in Masdar City [2getthere, 2012]

Es gibt einige weitere Städte, welche Systeme des Automated Guideway Transits gebaut haben und verwenden. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von bisher nicht umgesetzten Planungen. Eines der ungelösten Probleme ist meist eine nicht stadtverträgliche Infrastruktur.

3 Verkehrsfluss und Kapazität

Der Verkehrsfluss einer Straße kann durch Beobachtungen an einem Querschnitt (lokal) oder an einem Streckenabschnitt (momentan) beschrieben werden. Lokal können die Verkehrsstärke q sowie die mittlere lokale Geschwindigkeit \bar{v}_l und momentan die Verkehrsdichte k und die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m ermittelt werden. Der Zusammenhang zwischen der mittleren lokalen und momentanen Geschwindigkeit kann der Formel 1 entnommen werden.

Formel 1: Zusammenhang mittlerer lokaler und momentaner Geschwindigkeit [Leutzbach, 1972]

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma_m(v)^2}{\bar{v}_m}$$

mit $\sigma_m(v)^2$... Varianz der momentanen Geschwindigkeit

\bar{v}_l ... mittlere lokale Geschwindigkeit

\bar{v}_m ... mittlere momentane Geschwindigkeit

Der Zusammenhang der Geschwindigkeit \bar{v}_m , der Verkehrsdichte k und der Verkehrsstärke q wird als Zustandsgleichung bezeichnet (siehe Formel 2) und kann im Fundamentaldiagramm graphisch dargestellt werden (siehe Abbildung 14).

Formel 2: Zustandsgleichung

$$q = k * \bar{v}_m$$

mit q ... Verkehrsstärke [Fz/h]

k ... Verkehrsdichte [Fz/km]

Die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m ist ein wichtiger Faktor für die Reisegeschwindigkeit und wird im Folgenden als v bezeichnet.

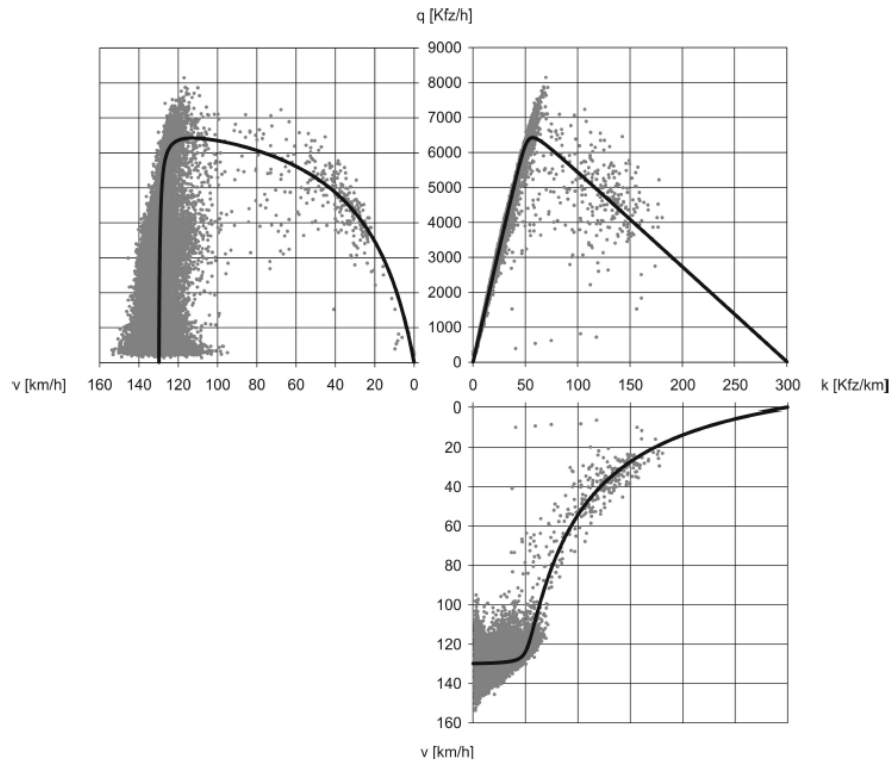


Abbildung 14: Fundamentaldiagramm einer vierstreifigen Autobahn [Geistefeldt, 2007]

Sind hohe Geschwindigkeiten, niedrige Verkehrsdichten sowie -stärken vorhanden, so spricht man von einem freien Verkehrsfluss. Der Punkt an dem die maximale Verkehrsstärke erreicht ist und diese anschließend abfällt, wird als Kapazität bezeichnet. Die Geschwindigkeiten sinken und es kommt zu einem gestauten Verkehrsfluss bei hohen Verkehrsdichten. Für einen funktionalen Zusammenhang über alle Verkehrszustände (k-v Ebene im Fundamentaldiagramm) kann der Ansatz von van Aerde herangezogen werden. Dieser Ansatz beruht auf einem Fahrzeugfolgemodell und lässt sich nach Formel 3 beschreiben. [Van Aerde et al., 1995]

Formel 3: Ansatz von van Aerde (1995)

$$k(v) = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{C_1 + \frac{C_2}{v_0 - v} + C_3 * v}$$

mit Δx ... Weglücke zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen
 v_0 ... mittlere, momentane Geschwindigkeit bei freiem Verkehr
 $C_1 - C_3$... Modellparameter

Die Weglücke zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen (Δx) setzt sich zusammen aus

- einem konstanten Term
- der Differenz zwischen aktueller Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss
- und einem linear von der aktuellen Geschwindigkeit abhängigen Term

3.1 Definition der Kapazität

„Die größtmögliche Verkehrsstärke, die vom Querschnitt einer Straße unter den vorhandenen Weg- und Verkehrsbedingungen aufgenommen werden kann, wird als Kapazität bezeichnet.“ [Schnabel, 2011, S.73]

„Die Leistungsfähigkeit einer Straßenverkehrsanlage ist gekennzeichnet durch die Verkehrsmenge, die eine Straße, eine Fahrbahn, ein Fahrstreifen oder ein Knotenpunkt unter bestimmten Bedingungen je Zeiteinheit zu bewältigen vermag.“ [Mensebach, 2004, S.93]

Der Begriff Kapazität ist gleichzusetzen mit Leistungsfähigkeit und Durchlässigkeit. Um diese zu bestimmen, müssen Straßenabschnitte mit gleichen Charakteristiken herangezogen werden. Die Kapazität wird maßgeblich von baulichen, verkehrlichen und sonstigen Bedingungen beeinflusst. Dazu zählen etwa die Anzahl der Fahrstreifen, die Querschnittsgestaltung, Sicht, Fahrgewohnheiten, Fahreigenschaften der Fahrzeuge, Witterung und rechtliche Bestimmungen. [Schnabel, 2011]

In Deutschland haben sich laut Mensebach drei unterschiedliche Begriffe der Leistungsfähigkeit eingebürgert. Dabei handelt es sich um die „grundlegende Leistungsfähigkeit“, die „mögliche Leistungsfähigkeit“ und die „praktische Leistungsfähigkeit“. Bei der grundlegenden Leistungsfähigkeit sind bei ausgezeichneten Fahrbahn- und Verkehrsbedingungen, einer homogenen Verkehrszusammensetzung sowie einer konstanten Geschwindigkeit aller Fahrzeuge bis zu 2000 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen möglich. Die mögliche Leistungsfähigkeit beschreibt eine im Ausnahmefall zu bewältigende Verkehrsmenge. Bei Knotenpunkten wird hierbei davon ausgegangen, dass die Zufahrten überstaut sind. Im Falle der möglichen Leistungsfähigkeit geht man von maximal 1800 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen aus. Nach der praktischen Leistungsfähigkeit werden Straßen bemessen und beschreiben die maximale Anzahl an Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen mit zumutbaren Gefahren, Verzögerungen, Wartezeiten und Beschränkung der Bewegungsfreiheit der Fahrzeuge. [Mensebach, 2004]

Die von der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV) herausgegebenen Richtlinien besagen, dass die Leistungsfähigkeit von der Längsneigung, der Kurvigkeit und dem Schwerverkehrsanteil abhängt. [RVS 03.01.11, 2012]

Um zu beschreiben, wie sehr die Kapazität einer Strecke ausgenutzt wird, gibt es den Begriff der Auslastung. Der Auslastungsgrad ist die vorhandene Verkehrsstärke q dividiert durch die Kapazität C . [Schnabel, 2011]

Formel 4: Auslastungsgrad einer Strecke

$$a = \frac{q}{C}$$

mit a ...Auslastung

C ...Kapazität

3.2 Ermittlung der Kapazität

Da es sich bei der Kapazität einer Straße um eine stochastische Größe mit vielen Einflussfaktoren (Witterungsbedingungen, Fahrverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer, Beeinflussung durch benachbarte Netzabschnitte, etc.) handelt, kann die Kapazität nicht direkt durch eine Messung der Verkehrsstärke ermittelt werden. Es existieren jedoch verschiedene Ansätze um die Kapazität empirisch über andere Kenngrößen zu bestimmen (siehe Kapitel 3.2.2). Des Weiteren werden in

Richtlinien Kapazitätswerte für unterschiedliche Streckentypen angegeben. Für zukünftige Szenarien kann der Verkehrsfluss mithilfe von mikroskopischen Verkehrsmodellen simuliert werden und daraus können Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit einer Strecke gezogen werden.

3.2.1 Richtlinien und Vorschriften

Für die Dimensionierung von neu zu errichtenden Strecken werden zur Ermittlung der Kapazität Richtlinien herangezogen. Beispielsweise gibt es in Österreich die sogenannten RVS – Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen [RVS 03.01.11, 2012] und in Deutschland das HBS – Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS, 2001]. Die Werte für die Kapazität in den Richtlinien stellen immer mittlere zu erwartende Kapazitäten dar, da das unterschiedliche Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu Variationen führt. Sie stellen also die Kapazität als einen konstanten Wert dar, welcher aufgrund des Ansatzes von van Aerde (siehe Kapitel 3), als Scheitelpunkt im q-v Diagramm ermittelt wurde.

RVS – Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen:

In der RVS 03.01.11 (2012) – *Beurteilung des Verkehrsablaufes auf Straßen* – findet man Kapazitäten für mehrstreifige Richtungsfahrbahnen sowie für zweistreifige Freilandstraßen. Aus den Tabellen wurden jene Werte entnommen, welche einen Schwerverkehrsanteil (SV-Anteil) von 0% enthalten, eine geringe Steigung von unter 2% aufweisen, sowie eine Kurvigkeit von unter 75 gon/km.

Tabelle 3.1 zeigt die Leistungsfähigkeit von mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen sowie zweistreifigen Freilandstraßen und die daraus resultierende Kapazität pro Stunde und Fahrstreifen.

Tabelle 3.1: Kapazitäten laut [RVS 03.01.11, 2012]

		mehrestreifige Richtungsfahrbahn			zweistreifige Freilandstraße
Fahrstreifen	[#]	2	3	4	2
Fahrzeuge pro Stunde	[Kfz/h]	3900	5900	7850	2500
Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen	[Kfz/h/FS]	1950	1967	1963	1250

Es ist zu erkennen, dass auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen laut RVS knapp 2000 Fahrzeuge pro Stunde auf einem Fahrstreifen Platz finden, auf Freilandstraßen hingegen nur etwa 1250 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen. [RVS 03.01.11, 2012]

HBS – Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen:

Auch die in der HBS dargelegten Grenzwerte beschreiben eine mittlere zu erwartende Kapazität. Die Leistungsfähigkeit für mehrstreifige Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbegrenzung ist dem Kapitel über die *Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte* zu entnehmen. Aus dem Kapitel der Streckenabschnitte von zweistreifigen Landstraßen können Kapazitäten für Landstraßen entnommen werden.

In Tabelle 3.2 sind diese Werte zusammengefasst und um diese vergleichbar zu machen, in Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen ausgewiesen. Es handelt sich wie auch schon bei den Werten der RVS um jene Kapazitäten, bei einem SV-Anteil von 0%, der kleinstmöglichen Steigung bzw.

Längsneigung sowie einer geringen Kurvigkeit von unter 75 gon/km. Außerdem wird im HBS auch noch zwischen Autobahnen innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen unterschieden.

Tabelle 3.2: Kapazitäten laut [HBS, 2001]

		mehrstreifige Richtungsfahrbahn				zweistreifige Landstraße
		Außerhalb von Ballungsräumen		Innerhalb von Ballungsräumen		
Fahrstreifen	[#]	2	3	2	3	2
Fahrzeuge pro Stunde	[Kfz/h]	3600	5400	4000	5700	2500
Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen	[Kfz/h/FS]	1800	1800	2000	1900	1250

Auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen ist also eine Kapazität von bis zu 2000 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrbahn und auf Landstraßen bis zu 1250 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrbahn möglich.

3.2.2 Empirische Ermittlung

Möchte man dagegen die Verkehrsmenge einer bestehenden Strecke ermitteln, so sind empirische Daten notwendig. Diese können mithilfe unterschiedlicher Ansätze ausgewertet werden. Im Folgenden werden zwei dieser Ansätze vorgestellt.

Fundamentaldiagramm

Wie bereits geschildert, kann mithilfe des van Aerde-Ansatzes ein durchgängiger Kurvenverlauf empirisch ermittelter Daten im Fundamentaldiagramm dargestellt werden. Der Wert der Kapazität ist laut diesen Kurven eine Konstante. [Van Aerde et al., 1995] Dieser Ansatz wurde 1996 von Ponzlet mit einem zusätzlichen, geschwindigkeitsabhängigen Term für den Bereich des gestauten Verkehrs erweitert. Dadurch ergibt sich der horizontale Sprung im Fundamentaldiagramm des q-v Bereiches, welcher die Kapazität beschreibt und der Wendepunkt der Kurve im k-v – Diagramm. [Ponzlet, 1996]

Stochastische Ansätze

Diese stochastischen Ansätze gehen davon aus, dass die Kapazität unabhängig von systematischen Einflüssen stark variiert. Bei Erreichung der Kapazität, also der maximal möglichen Verkehrsstärke, kommt es zu einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses. Vor diesem Zusammenbruch spricht man von einem flüssigen Verkehrsfluss und danach von einem zähflüssigen bzw. gestauten Verkehrsfluss. Das Eintreten dieses Ereignisses geschieht in der Regel plötzlich und bei unterschiedlichen Verkehrsstärken aufgrund zufälliger Schwankungen, wie der Zufälligkeit des Verkehrsablaufes, der Verkehrszusammensetzung und des individuellen Fahrverhaltens der Fahrzeuglenker. Dies bedeutet, dass die Kapazität als Zufallsgröße aufzufassen ist, welche durch eine Verteilungsfunktion beschrieben werden kann. Diese Verteilungsfunktion kann wiederum auf mehrere Arten beschrieben werden, im Folgenden sind zwei davon dargestellt. [Geistefeldt, 2007]

- Einbruchswahrscheinlichkeit

Einen Kapazitätsverlauf auf Basis der Einbruchswahrscheinlichkeit eines Verkehrsflusses zu bestimmen, wurde von Lorenz und Elefteriadou (2000) entwickelt und angewandt. Die Auswertung

erfolgt mithilfe von Verkehrsstärkeklassen, in welchen die Häufigkeit der Zusammenbrüche dargestellt wird.

- Lebensdauer des Verkehrsflusses

Diese Methode wurde von Brilon und Zurlinden (2003) entwickelt, welche sich an die Analyse von Lebensdauerdaten anlehnt. Zur Ermittlung der Verteilungsfunktion der Kapazität nach Lebensdauer des Verkehrsflusses werden die erhobenen Daten in zwei Kategorien eingeteilt. Einerseits in *unzensierte Intervalle*, in denen es zu einem Zusammenbruch kommt und die maximale Verkehrsstärke der Kapazität entspricht. Andererseits gibt es die *zensierten Intervalle*. In diesen Intervallen wird die Kapazität nicht erreicht, es kommt also nicht zu einem Zusammenbruch, sondern der Verkehr ist in einem fließenden Zustand. Dadurch kann die Aussage getroffen werden, dass die Kapazität auf jeden Fall höher liegt als die gemessene Verkehrsstärke in diesem Intervall. Alle anderen Intervalle, in denen zähflüssiger bzw. gestauter Verkehrsfluss vorherrscht, werden nicht für diese Analyse herangezogen.

Vergleich der konstanten mit der stochastischen Kapazität

Abbildung 15 zeigt nun den Vergleich der konstanten (grüne Linie) sowie der durch eine Verteilungsfunktion (rote Linie) dargestellten Kapazität. Die van Aerde Funktion wird hier von der k-v Ebene in die q-v Ebene transferiert und zeigt eine Kapazität von etwa 3800 Fahrzeuge pro Stunde. Die vorliegende Weibull-Funktion stellt die Verteilung der Kapazität nach der Einbruchswahrscheinlichkeit dar. Die gleiche Kapazität wie durch die van Aerde Funktion ergibt sich aus der Verteilungsfunktion bei einer Einbruchswahrscheinlichkeit von nur etwa 8%. Dies zeigt, dass die Kapazitäten, welche durch Verteilungsfunktionen beschrieben werden, deutlich höher sind als jene konstanten Werte aus dem Fundamentaldiagramm. [Brilon, 2004]

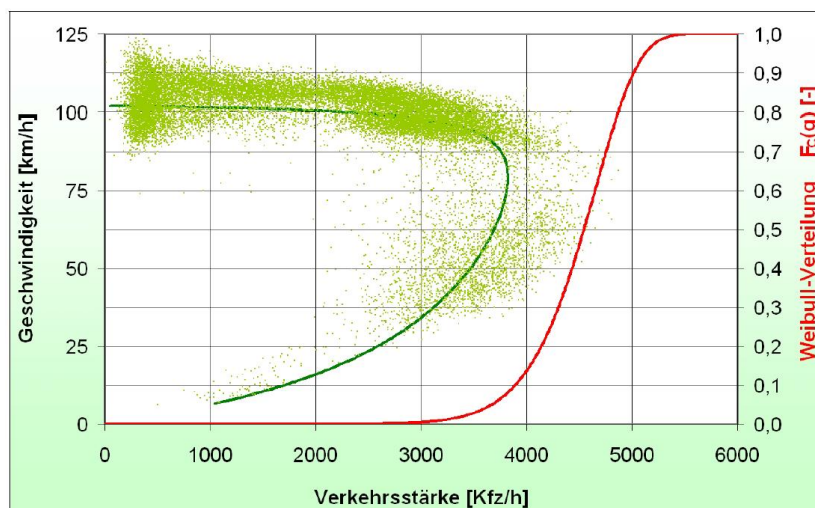


Abbildung 15: Vergleich der konstanten mit der stochastischen Kapazität [Brilon, 2004]

3.2.3 Mikroskopische Verkehrsmodelle

Mithilfe der Formulierung von Algorithmen kann die Wirklichkeit in Verkehrsmodellen nachgebildet werden. Je genauer die Wirklichkeit dargestellt werden soll, desto mehr Daten müssen erhoben und statistisch ausgewertet werden. Verkehrsmodelle sollen helfen, in Zukunft auftretende Ereignisse darzustellen und deren Auswirkungen abschätzen zu können (Planfälle). Verkehrsmodelle können in makroskopische und in mikroskopische Modellgruppen eingeteilt werden. [Fellendorf, 2013]

In makroskopischen Verkehrsmodellen betrachtet man alle Fahrzeuge zusammengefasst in einem bestimmten Gebiet und beschreibt diese mit Kennwerten. [Geistefeldt, 2007]

Die Ermittlung des Verkehrsaufkommens für Makromodelle erfolgt aus Strukturdaten. In Mikromodellen wird das Verkehrsverhalten einzelner Individuen oder verhaltenshomogener Personengruppen durch Simulationsverfahren dargestellt. Makroskopische Beziehungen ergeben sich aufgrund der Zusammenfassung mehrerer Mikrobeziehungen. [Fellendorf, 2013]

Bei Simulationen wird der Zufluss von Fahrzeugen absichtlich etwas höher gewählt, als vom Modell bewältigbar. Die Verkehrsstärke wird stromabwärts gemessen und es ist darauf zu achten, dass bei einem möglichen Rückstau die Messungen am Querschnitt nicht beeinflusst werden.

3.3 Kapazitätsbeschränkungsfunktion (CR-Funktion)

Die Verkehrsumlegungsverfahren in mikroskopischen Verkehrsmodellen basieren auf Kurzwegalgorithmen, welche widerstandsminimale Routen ermitteln. Der Widerstand einer Route ist abhängig von deren Belastung und die Wahl der Route der Verkehrsteilnehmer ist stark abhängig von der Reisezeit und Länge der Route sowie eventuellen Straßenbenutzungsgebühren. Der Widerstand wird individuell je Verkehrssystem gewählt und hängt von der aktuellen Fahrzeit, der Streckenlänge sowie etwaigen Streckentypfaktoren ab. Die aktuelle Fahrzeit von Routen kann durch Kapazitätsbeschränkungsfunktionen (CR-Funktionen) berechnet werden, wobei sich die Fahrzeit verlängert sobald die Verkehrsbelastung zunimmt. Mit zunehmender Verkehrsbelastung können mithilfe von Widerständen Alternativrouten im Netz erzwungen werden. [VISUM, 2014]

Die Capacity Restrained Function (CR-Funktion) bzw. im englischen Volume-Delay Function (VDF) genannt, beschreibt die Reisezeit in Abhängigkeit der Auslastung, wobei die Auslastung die aktuelle Verkehrsstärke im Vergleich zur Kapazität darstellt. Es gibt unterschiedliche Typen der CR-Funktionen wie etwa die BPR-, die Conical- oder die Akcelik-Funktion.

Dabei muss bei den Inputparametern der CR-Funktionen unterschieden werden in Parameter welche gemessen werden können (Kapazität und Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss) und in Funktionsparameter, welche geschätzt werden müssen (wie zB. α und β). All diese Funktionen gehen davon aus, dass die Kapazität ein konstanter Wert ist. Im Folgenden werden vier verschiedene CR-Funktionen vorgestellt.

BPR-Funktion (Bureau of Public Roads):

Formel 5: BPR-Funktion

$$t_{akt} = t_0 * \left[1 + \alpha * \left(\frac{q}{C} \right)^\beta \right]$$

mit t_{akt} ... aktuelle Fahrzeit im belasteten Netz
 t_0 ... Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss
 α, β ... Funktionsparameter

Die Verkehrsstärke durch die Kapazität beschreibt die Auslastung, welche im Diagramm auf der Abszisse aufgetragen ist. Bei einem Wert von 1 ist die Auslastung 100% und somit die Kapazität erreicht. Je höher der Wert für β ist, desto stärker steigt die Reisezeit nach Erreichen der Kapazität an (siehe Abbildung 16).

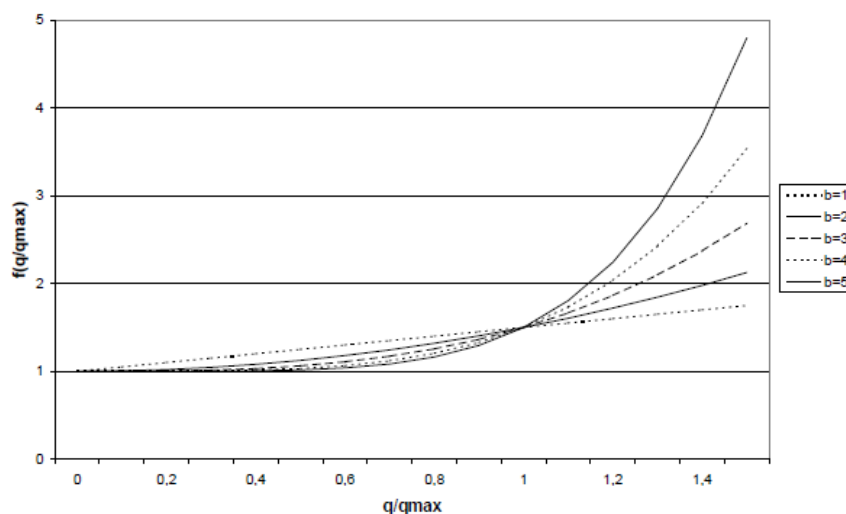


Abbildung 16: CR-Funktionstyp BPR für $\alpha = 0,5$ [Fellendorf, 2013]

Conical-Funktion:

Die Conical-Funktion ist eine hyperbolische Kurve mit dem Vorteil, dass nur ein Funktionsparameter geschätzt werden muss.

Formel 6: Conical-Funktion [Spiess, 1990]

$$f(a) = 2 + \sqrt{\alpha^2 * (1 - a)^2 + \left(\frac{2\alpha - a}{2\alpha - 2}\right)^2} - \alpha * (1 - a) + \left(\frac{2\alpha - a}{2\alpha - 2}\right)$$

Davidson:

Davidson hat 1966 eine allgemeine Formel für die Ermittlung der Reisezeit zum Zwecke der Verkehrsplanung aufgestellt, welche auf dem Konzept des Warteschlangenmodells basiert.

Formel 7: CR-Funktion nach Davidson (1966)

$$t = t_0 * \frac{1 + J_D * a}{1 - a}$$

mit J_D ... Verspätungsparameter

Akcelik:

Akcelik entwickelte eine modifizierte, zeitabhängige Form der Davidson-Funktion, welche den Analysezeitraum berücksichtigt.

Formel 8: Funktion nach Akcelik (2000)

$$t = t_0 + 0,25 * T_f * \left(a - 1 + (a - 1)^2 + \frac{8 * J_D * a}{C * T_f} \right)$$

mit T_f ...Analysezeitraum (zB. 1h)

All diese Funktionen gehen, wie oben schon beschrieben, von einem konstanten Kapazitätswert aus. Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, zeichnet sich die Kapazität durch dessen Stochastik aus und kann so nur durch eine Verteilungsfunktionen beschreiben werden, beispielsweise durch die Lebensdauer des Verkehrsflusses nach Brilon und Zurlinden (2013). Brilon hat die Stochastik der Kapazität durch die Weibull Funktion beschrieben.

Ziel von Neuhold und Fellendorf (2014) war es, eine Kombination aus der CR-Funktion (BPR) und der Verteilungsfunktion der Kapazität (Weibull) herzustellen. Dazu wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen Modellen durchgeführt.

- 1. Modell: BPR-Funktion mit α ist konstant 0,8 und β wird geschätzt
- 2. Modell: beide Funktionsparameter (α und β) der BPR-Funktion werden geschätzt

Für die nominale Kapazität, die Kapazität bei einer Einbruchswahrscheinlichkeit von 20% sowie 80% wurden Werte für die Funktionsparameter ermittelt und in BPR-Funktionen dargestellt. [Neuhold, Fellendorf, 2014]

3.4 Geschwindigkeitsverteilung

Die Wunschgeschwindigkeit wird definiert als jene Geschwindigkeit, welche ein Fahrer auf freier Strecke ohne jede Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer wählen würde. [Geistefeldt, 2007]

Geschwindigkeitsverteilungen sind S-förmig und zeigen somit auf, dass die meisten Verkehrsteilnehmer im Bereich der mittleren Geschwindigkeit fahren.

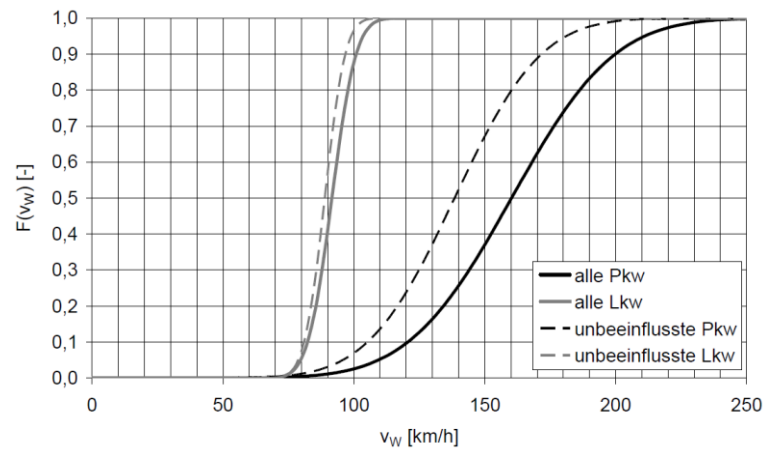


Abbildung 17: Geschwindigkeitsverteilung [Geistefeldt, 2007]

Abbildung 17 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung nach Geistefeldt, welcher Untersuchungen auf mehrspurigen Autobahnen durchgeführt hat. Es zeigt sich hier, dass die Verteilung der Geschwindigkeiten bei PKWs deutlich höher ist als bei LKWs.

4 Modellierung des Fahrverhaltens in VISSIM

Dieses Kapitel behandelt das Fahrverhalten der Fahrzeuge und der Fahrzeuglenker sowie einer Kombination aus Beiden. Hierzu lieferte Wiedemann einen wichtigen Beitrag und beschrieb die sogenannten „Fahrer-Fahrzeug-Elemente (FFE)“, welche den Bewegungsablauf von Fahrzeugen in Kombination mit deren Fahrern widerspiegeln. Dabei spielen vor allem das Folgeverhalten, das Spurwechselverhalten, die Wunschgeschwindigkeitsverteilung sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten von Fahrzeugen eine wichtige Rolle. [Wiedemann et al., 1977]

4.1 Fahrzeugfolgeverhalten

In der Verkehrssimulationssoftware VISSIM 5.40 der PTV AG (folgend als VISSIM bezeichnet) wird das Fahrverhalten unter anderem durch das Fahrzeugfolgeverhalten nach Wiedemann definiert und gesteuert. Dieses basiert auf dem psycho-physischen Wahrnehmungsmodell von Wiedemann (1974). Es beschreibt die Oszillation der Fahrzeuge beim Auffahren auf ein langsameres Fahrzeug. Zuerst fährt das Folgefahrzeug schnell auf. Wenn es dann einen gewissen Abstand erreicht hat, nimmt die Beschleunigung wieder ab und wird später zu einem Verzögern. Wenn der Abstand wieder groß genug ist, nimmt das Folgefahrzeug wieder an Geschwindigkeit zu und versucht so sich dem Vorderfahrzeug anzunähern. Dieses Fahrzeugfolgemodell wurde aufgrund zahlreicher Messungen des Instituts für Verkehrswesen an der Uni Karlsruhe durchgeführt und wird in Abbildung 18 aufgezeigt.

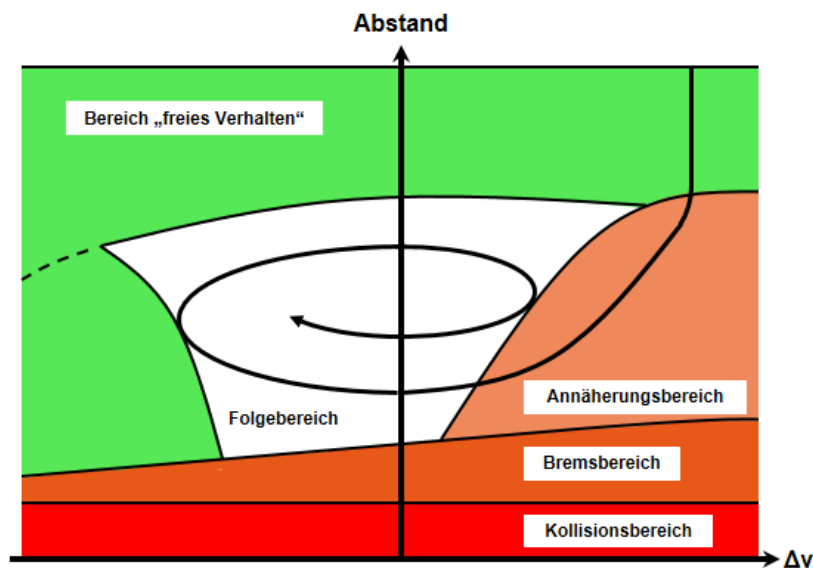


Abbildung 18: Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann [VISSIM, 2014]

Der Fahrer eines Fahrzeuges befindet sich in einem der folgenden vier Fahrzustände:

- Im Bereich *freies Fahren* gibt es keinen Einfluss durch vorausfahrende Fahrzeuge. Der Fahrer versucht hier seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und diese auch beizubehalten. Aufgrund des menschlichen, nicht perfekten Fahrverhaltens pendelt die Geschwindigkeit um die Wunschgeschwindigkeit herum.

- Wenn nun das Fahrzeug auf ein Vorderfahrzeug trifft, dessen Geschwindigkeit geringer ist als die des Folgefahrzeuges, befindet es sich vorerst im *Annäherungsbereich*. Hier versucht das schnellere Fahrzeug auf des langsamere Fahrzeug aufzufahren, wobei die Geschwindigkeitsdifferenz gegen Null wandert.
- Der weiße Bereich in Abbildung 18 wird als *Folgebereich* bezeichnet. Hier versucht der Fahrer sich hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug zu orientieren, da ihm dies aber nicht zu 100% gelingt, wird er immer wieder leicht abbremsen und beschleunigen. Dieser Vorgang wird als Oszillation der Geschwindigkeit bezeichnet.
- Wird der gefühlte Abstand zwischen dem Vorder- und dem Folgefahrzeug nun wieder zu klein (z.B. durch Abbremsen des Vorderfahrzeugs), so beginnt das Folgefahrzeug zu *bremsen* (*Bremsbereich*).

Da die Wahrnehmungsfähigkeit unterschiedlicher Fahrzeuglenker sowie psychologische Aspekte berücksichtigt werden, wird der Modellansatz von Wiedemann als psycho-physisches Fahrzeugfolgemodell bezeichnet.

[VISSIM, 2014]

Hinsichtlich Fahrzeugfolgeverhalten kann in VISSIM zwischen 3 verschiedenen Modellen unterschieden werden:

- Wiedemann 74
- Wiedemann 99
- Interaktionsfrei

In diesem Projekt wurden die Folgeverhaltensparameter nach Wiedemann 99 gewählt, da hier die Oszillation bezüglich der Geschwindigkeitsdifferenz und des Abstandes zum Vorderfahrzeug geringer ist als bei Wiedemann 74. Außerdem ist es möglich detaillierter in das Fahrverhalten einzugreifen und zu steuern. [VISSIM, 2014]

Tabelle 4.1 zeigt alle relevanten Parameter mit den VISSIM-Standardinstellungen für das Fahrzeugfolgeverhalten nach Wiedemann 99. Der Stillstandsabstand (CC0) wird in Metern angegeben und beschreibt den durchschnittlichen Wunschabstand zum Vorderfahrzeug bei einer Geschwindigkeit von 0 km/h.

Tabelle 4.1: Parameter Fahrzeugfolgeverhalten Wiedemann 99 [VISSIM, 2014]

Parameter	Beschreibung	Standardeinstellung VISSIM	Einheit
CC0	Stillstandsabstand	1,50	m
CC1	zeitlicher Folgeabstand	0,90	s
CC2	Abstandsdifferenz (Längsoszillation)	4,00	m
CC3	Wahrnehmungsschwelle für Folgen/ Beginn Verzögerungsvorgang	-8,00	s
CC4	negative Geschwindigkeitsdifferenz	-0,35	m/s
CC5	positive Geschwindigkeitsdifferenz	0,35	m/s
CC6	Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation	11,44	-
CC7	Beschleunigung bei Oszillation	0,25	m/s ²
CC8	Beschleunigung aus Stillstand	3,50	m/s ²
CC9	Beschleunigung bei 80 km/h	1,50	m/s ²

Um den gewünschten Sicherheitsabstand beim Fahren zwischen zwei Fahrzeugen zu ermitteln, wird CC0 addiert mit dem Produkt der aktuellen Geschwindigkeit und des Folgeabstandparameters (CC1). Dieser zeitliche Folgeabstand beschreibt den minimalen Abstand in Sekunden, welcher das Fahrzeug bei einer gewissen Geschwindigkeit beibehalten soll. Die Kapazität wird maßgeblich von diesem zeitlichen Folgeabstand beeinflusst.

Die Abstandsdifferenz, welche ein Folgefahrzeug zwischen sich und dem vorausfahrenden Fahrzeug zulässt bevor es bewusst aufrückt (Längsoszillation), wird durch den Parameter CC2 festgelegt. Wird dieser Abstand erreicht so fährt das Folgefahrzeug wieder bis zum Sicherheitsabstand auf.

Jene Zeit (in Sekunden), welche ein Fahrzeug noch benötigt um auf das Vorderfahrzeug mit dessen Sicherheitsabstand zu treffen, spiegelt sich in Parameter CC3 wider – die sogenannte Wahrnehmungsschwelle des Folgens bzw. der Beginn des Verzögerungsvorgangs.

CC4 und CC5 beschreiben jeweils die positive und negative Geschwindigkeitsdifferenz während des Folgevorgangs. Je niedriger der Betrag dieser Werte, desto empfindlicher reagiert das Folgefahrzeug auf die Geschwindigkeitsunterschiede des Vorderfahrzeugs und umso geringer ist die Oszillation. Das heißt, bei einer Geschwindigkeitsdifferenz von 0 km/h fährt das Fahrzeug immer in konstantem Sicherheitsabstand hinter einem anderen her.

Hinter CC6 verbirgt sich der Einfluss des Abstandes auf die Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs.

Durch CC7 wird die Beschleunigung während der Oszillation angegeben, je höher dieser Wert ist, desto schneller beschleunigt das Fahrzeug wenn es sich im Bereich des Folgens befindet.

Die Beschleunigung aus dem Stillstand eines Fahrzeuges wird über den Parameter CC8 ausgedrückt und die Beschleunigung bei 80 km/h über CC9.

Auch können die Voraus- und die Zurückschauweite in Anzahl der Fahrzeuge bzw. in Meter variiert werden, welche angibt, wie weit sich Fahrer gegenseitig wahrnehmen und aufeinander reagieren (siehe Tabelle 4.2). [VISSIM, 2014]

Tabelle 4.2: Weitere Folgeverhaltensparameter

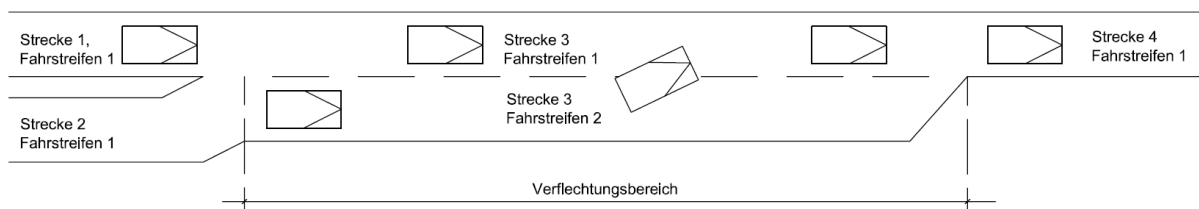
Parameter	Beschreibung	Standardeinstellung VISSIM	Einheit
VSW_{Min}	minimale Vorausschauweite	0	m
VSW_{Max}	maximale Vorausschauweite	250	m
VSW_{Fz}	Vorausschauweite in Anzahl Fz	4	# Fz
ZSW_{Min}	minimale Zurückschauweite	0	m
ZSW_{Max}	maximale Zurückschauweite	150	m

4.2 Fahrstreifenwechselverhalten

Bei der Simulation wird zwischen zwei Arten von Fahrstreifenwechsel unterschieden, dem „notwendigen Fahrstreifenwechsel“ und dem „freien Fahrstreifenwechsel“. Erster ist notwendig um auf eine neue Verbindungsstrecke zu gelangen und die Fahrer agieren im Falle des notwendigen Fahrstreifenwechsels deutlich aggressiver und nutzen die maximalen Verzögerungswerte sowie die minimalen Sicherheitsabstände aus. Beim freien Fahrstreifenwechsel entscheidet sich der Fahrzeuglenker für einen von mehreren Fahrstreifen.

Bei einer Verflechtungsstrecke muss ein notwendiger Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden, um die Route weiterverfolgen zu können. Diese wird wie Abbildung 19 zeigt, in VISSIM mit vier Strecken modelliert. Zwischen Strecke 1 und 3, zwischen Strecke 2 und 3 sowie zwischen Strecke 3 und 4 befindet sich je eine Verbindungsstrecke. Die Strecke 3 besteht aus zwei Fahrstreifen, alle anderen aus einem Fahrstreifen. Die Fahrzeuge müssen von Fahrstreifen 2 auf Fahrstreifen 1 der Strecke 3 wechseln um die Route weiter verfolgen zu können. Dabei wird die Zeitlücke zwischen Fahrstreifenwechsler und dem Fahrzeug auf dem Fahrstreifen 1 ermittelt und aufgrund der Mindestnettoweglücke und des Sicherheitsabstandes entschieden, wann der Fahrstreifenwechsler einfahren kann. Die Mindestnettoweglücke gibt den Abstand an, welcher nach dem Fahrstreifenwechsel zwischen zwei Fahrzeugen (vorne und hinten) vorhanden sein muss.

Je näher ein Fahrzeug des zweiten Fahrstreifens dem Ende zukommt, desto aggressiver drängt es in eine Lücke hinein.

**Abbildung 19: Notwendiger Fahrstreifenwechsel**

Mit dem Faktor des reduzierten Sicherheitsabstandes kann der ursprüngliche Sicherheitsabstand für die Dauer des Fahrstreifenwechsels auf einen bestimmten Prozentsatz reduziert werden. Auch dies könnte einen ausschlaggebenden Faktor der Kapazität darstellen.

Außerdem gibt es die Möglichkeit des kooperativen Bremsens. Will ein Fahrzeug des Fahrstreifens 1 auf den Fahrstreifen 2 wechseln, so überprüft es die Weg- bzw. Zeitlücke. Reicht diese aus, kann das

Fahrzeug einfahren. Reicht die Weg- bzw. Zeitlücke nicht aus, so gibt es nun zwei Möglichkeiten. Würde diese Lücke ausreichen wenn das Fahrzeug des ersten Fahrstreifens kooperativ abbremst, so tut das Fahrzeug dies. Ergibt sich jedoch durch Berechnungen, dass sich auch durch das kooperative Bremsen keine ausreichende Weg- bzw. Zeitlücke auf tut, so fährt das Fahrzeug des ersten Fahrstreifens ungebremst weiter und das Fahrzeug des zweiten Fahrstreifens muss auf die nächste freie Lücke warten.

In Tabelle 4.3 sind die wesentlichen Fahrstreifenwechselfparameter mit den dazugehörigen standardmäßig bei VISSIM eingestellten Werten zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Fahrstreifenwechselfparameter

Parameter	Beschreibung	Standardeinstellung VISSIM	Einheit
NW_{Min}	Minimale Nettoweglücke (vorne/hinten)	0,50	m
Si_{Red}	Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	-
$Brems_{Koop}$	Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	-3,00	m/s ²

All diese Parameter können in VISSIM variiert werden, um ein gewünschtes Fahrverhalten zu erzeugen und somit die Kapazität auf Strecken verändern zu können.

II. Methodik und Auswertung

Um die Kapazität autonomer Fahrzeuge ermitteln zu können, musste zuerst ein Konzept ausgearbeitet werden. Dieses Konzept wird als methodische Vorgehensweise beschrieben und findet sich in Kapitel 5. Anschließend folgt die Ermittlung der Kapazität unterschiedlicher Strecken und deren Auswertungen in Kapitel 6 und 7. Diese drei Kapitel stellen den zweiten Teil der Arbeit – *Methodik und Auswertung* – dar.

5 Methodische Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird die Methodik erklärt, die zur Ermittlung der Kapazität notwendig war und angewendet wurde.

5.1 Modellbasierte Leistungsfähigkeitsbetrachtung

Abbildung 20 zeigt die schematische Vorgehensweise für die Ermittlung der Kapazität von autonomen Fahrzeugen auf unterschiedlichen Streckentypen in der vorliegende Masterarbeit.

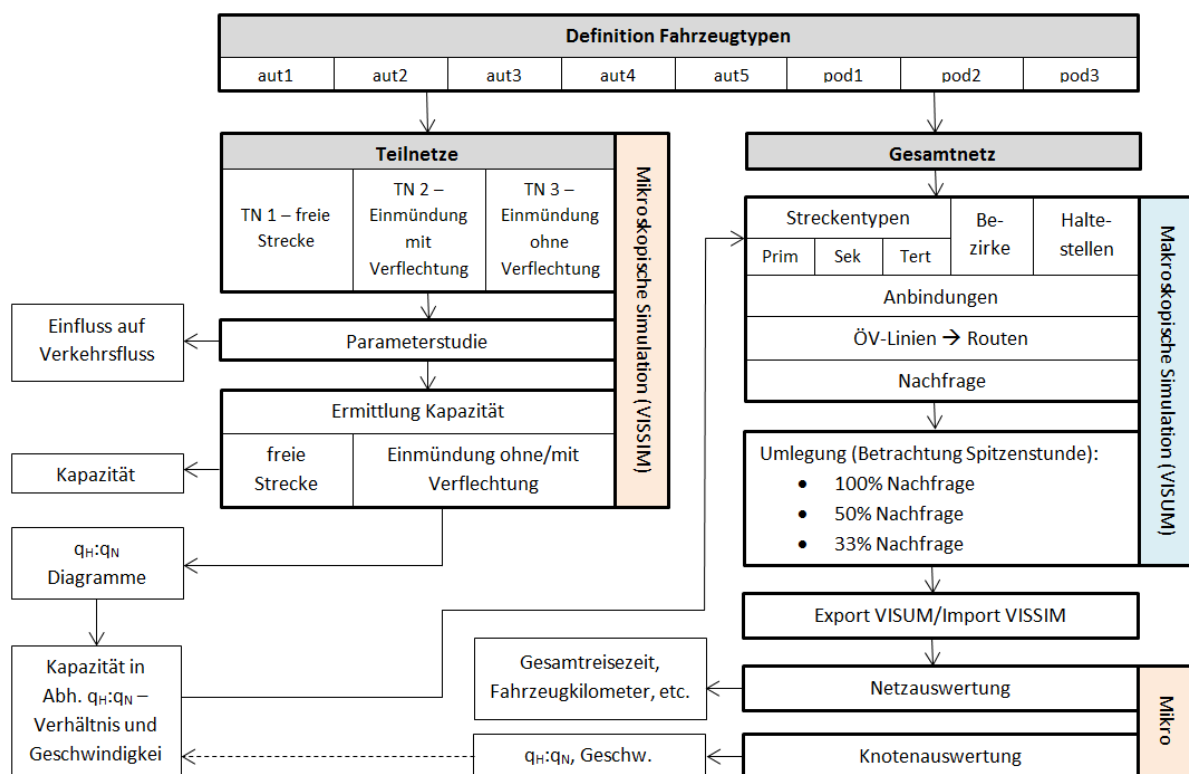


Abbildung 20: Methodik der Leistungsfähigkeitsermittlung autonomer Fahrzeuge

Zuerst werden Fahrzeugtypen für autonome Fahrzeuge definiert (Kapitel 5.2), wobei zwischen individuell fahrenden, IV-ähnlichen autonomen Fahrzeugen (*aut1* bis *aut5*) und ÖV-ähnlichen Fahrzeugen (*pod1* bis *pod3*), welche in einem definierten Takt auf Linien verkehren, unterschieden wird.

Im mikroskopischen Modell werden drei verschiedene Teilnetze erstellt, welche sich hinsichtlich der Einmündung einer Straße unterscheiden (ohne Einmündung/freie Strecke, Einmündung ohne

Verflechtungsbereich, Einmündung mit Verflechtungsbereich). Mit diesen Teilnetzen werden dann Fahrverhaltensparameter und deren Auswirkung auf die Kapazität getestet (Kapitel 6.2). Anschließend können mit den vorliegenden Erfahrungen die möglichen Kapazitäten auf freier Strecke (Kapitel 6.3) sowie auf Einmündungen ohne (Kapitel 6.4) und mit Verflechtungsbereich (Kapitel 6.5) ermittelt werden. Bei den Streckentypen mit Einmündung ergeben sich durch den unterschiedlichen Zufluss der beiden Strecken (Hauptstrom q_H , Nebenstrom q_N) Diagramme, welche die Kapazitätsanteile von Haupt- zu Nebenstrom sowie die Gesamtkapazität in Abhängigkeit des Nebenstromes darstellen. Aus diesen wiederum können q - v Diagramme (maximale Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Wunschgeschwindigkeit) mit Kurven für unterschiedliche Zusammensetzungen der Zuflüsse dargestellt werden (Kapitel 6.4.1 und 6.5.1).

Diese Erkenntnisse aus der mikroskopischen Simulation werden dann in ein makroskopisches Gesamtnetz (Kapitel 7) übertragen, welches einen Teil von Singapur darstellt, der auf Basis von Open-Street-Map (OSM) erstellt wird. Das fiktive Gesamtnetz ist charakterisiert durch drei unterschiedliche Streckentypen, die sich hinsichtlich unterschiedlicher Fahrzeugtypen und Geschwindigkeiten unterscheiden. Das Netz wird mit Bezirken, Haltestellen, Anbindungen, ÖV-Linien und deren Routen sowie einer Nachfrage versehen (Kapitel 7.2). Danach erfolgt im makroskopischen Verkehrsmodell eine Verkehrsumlegung sowohl mit 100%, 50% als auch mit 33% der Nachfrage und deren Auswertungen bezüglich Haltestellen und Auslastung des Netzes (Kapitel 7.3). Durch den Import in ein mikroskopisches Verkehrsmodell (Kapitel 7.4) und der anschließenden Simulation können die Gesamtreisezeit sowie die Fahrzeugkilometer des Gesamtnetzes ermittelt werden (Kapitel 7.5.1). Die Betrachtung einzelner Knotenpunkte dieses Gesamtnetzes geben Aufschluss über Verkehrsfluss und Geschwindigkeit. Abschließend erfolgt der Vergleich bzw. der Rückschluss der Knotenauswertungen des Gesamtsystems mit denen der separat betrachteten Einmündungen mit Verflechtungsbereich (Kapitel 7.5.2).

5.2 Definition der Fahrzeugtypen

Für die folgenden Studien wurden im Rahmen des Projektes AVESTRA (Analyse von autonomen Verkehrssystemen im städtischen Raum) gemeinsam mit dem Kompetenzzentrum Virtuelles Fahrzeug (ViF) neun unterschiedliche Fahrzeugklassen und -typen definiert. Bei der ersten Fahrzeugklasse (*konventionell - konv*) handelt es sich um konventionelle Fahrzeuge, in der nur ein Fahrzeugtyp definiert ist, welches einem Standard-Mittelklasse Pkw mit 5 Sitzen (zB. VW Golf) entspricht. Die weiteren Fahrzeuge unterteilen sich in die Fahrzeugklassen *autonom - aut* und *podcar - pod*. Beide Fahrzeugtypen können selbstständig (also fahrerlos), ohne weitere Kontrolle durch einen Fahrzeuglenker, verkehren. Für den späteren Projektverlauf ist diese Unterteilung jedoch notwendig, da autonome Fahrzeuge dem IV angehören, welche Personen von Haustür zu Haustür transportieren. Podcars hingegen agieren wie öffentliche Verkehrsmittel. Personen können an Haltestellen zusteigen, jedoch mit der Besonderheit eines sehr kurzen Taktes bzw. auf Abruf, um mit möglichst wenig bis gar keinen Zwischenstopps an das Ziel zu gelangen.

Es wurden fünf Typen autonomer Fahrzeuge (*aut1* bis *aut5*) und drei Typen Podcars (*pod1* bis *pod3*) definiert, welche sich in Länge, Gewicht, Anzahl der Sitze sowie deren Maximalbeschleunigungen unterscheiden (siehe Tabelle 5.1 und Abbildung 22). Durch das vollständig automatisierte Fahren und der Möglichkeit der gegenseitigen Fahrzeugkooperation ist ein deutlich optimiertes Fahrverhalten (zB: geringere Abstände, schnellere Reaktionen, etc.) sowie eine Kapazitätssteigerung auf Strecken zu erwarten.

Tabelle 5.1: Definierte Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen

	Fahrzeugtypen		Gewicht kg	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Pmax kW	Anzahl Sitze
	Abkürzung	NR						
Konventionelles Kfz	Pkw	100	1250	4255	1799	1452	60	5
Autonomes Kfz 1	aut1	121	975	2700	1560	1565	55	2
Autonomes Kfz 2	aut2	122	500	3550	1550	1310		2
Autonomes Kfz 3	aut3	123	1214	3540	1645	1500	60	4
Autonomes Kfz 4	aut4	124	600	2850	1420	1480	51	4
Autonomes Kfz 5	aut5	125	2500	6000	2000	2700	192	10
Podcar 1	pod1	131	450	3000	1500	1400	35	2
Podcar 2	pod2	132	850	3700	1700	1800	55	4
Podcar 3	pod3	133	2000	6000	2000	2700	130	10

Da die Länge der autonomen Fahrzeuge sowie der Podcars maximal 6 Meter beträgt, können diese unter der Kategorie „Pkw“ eingestuft werden. In Verkehrsmodellen gibt es den Begriff der Pkw-Einheiten, welcher für Lkw größer 1 und für Motorräder kleiner 1 angenommen wird. Das Endergebnis wird dann in Pkw-Einheiten vereinheitlicht dargestellt. Im Folgenden wird von Fahrzeugen (Fz) gesprochen, welche im Projekt gleichzusetzen sind mit Pkw-Einheiten.

Mischsystem

Ergänzend wurde ein Fahrzeugtyp eingeführt und untersucht, der aus einem Mix unterschiedlicher Fahrzeugtypen (*aut* und *pod*) besteht. Die Anteile der einzelnen Fahrzeugtypen im Mischsystem beruhen auf der Annahme eines 50%-igen Anteils IV-ähnlicher (*aut1* bis *aut5*) sowie ÖV-ähnlicher Fahrzeuge (*pod1* bis *pod3*) (siehe Abbildung 21).

Mischsystem		
Fahrzeugklasse	Fahrzeugtyp	Anteil
autonom	aut1	0.1
	aut2	0.1
	aut3	0.1
	aut4	0.1
	aut5	0.1
podcar	pod1	0.2
	pod2	0.2
	pod3	0.1

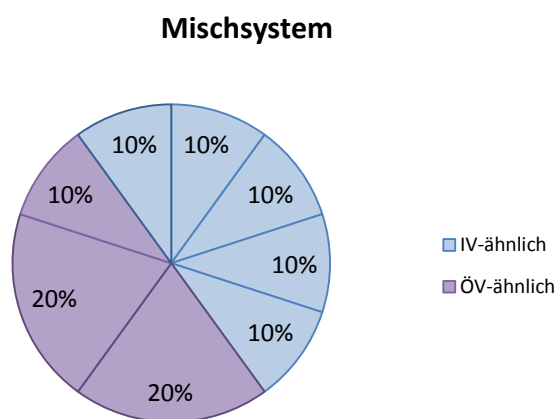


Abbildung 21: Aufteilung der Fahrzeugklassen des Mischsystems

Für autonome Fahrzeuge wird keine Geschwindigkeitsverteilung angenommen, sondern ein Wert, welcher der Wunschgeschwindigkeit entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass autonome Fahrzeuge keine Oszillation hinsichtlich der Geschwindigkeit aufweisen.

5.2.1 Funktionen der autonomen Fahrzeugtypen

Jedem Fahrzeugtyp wird eine eigene Maximalbeschleunigung, welche sich mit Erhöhen der Geschwindigkeit reduziert, zugeordnet. Diese Funktionsverläufe wurden vom ViF zur Verfügung gestellt. In Abbildung 22 sind jene Kurven der Maximalbeschleunigungen von autonomen Fahrzeugen (blau) und Podcars (rot) bis zu einer Geschwindigkeit von 120 bzw. 140 km/h dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass das autonome Fahrzeug 4 die höchste Maximalbeschleunigung von bis zu knapp 3,5 m/s² aufweist und somit am schnellsten die gewünschte Geschwindigkeit erreichen kann. Die geringsten Maximalbeschleunigungen im Bereich von 0 bis 60 km/h weisen das autonome Fahrzeug 3 sowie das Podcar 3 mit etwa 2 m/s² auf. Die maximale Beschleunigung bleibt bei allen Fahrzeugen bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h annähernd konstant und fällt anschließend ab.

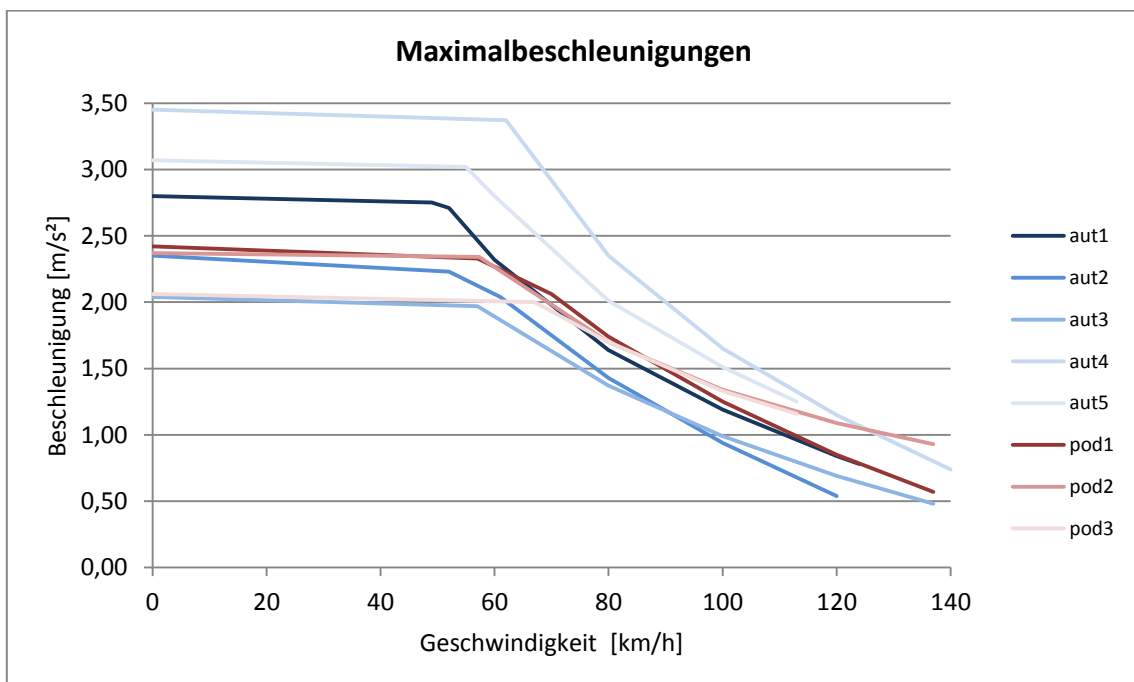


Abbildung 22: Maximalbeschleunigung autonomer Fahrzeuge und Podcars

Alle weiteren Annahmen zu Beschleunigungen und Verzögerungen sind, wie in Abbildung 23 ersichtlich, bei allen Fahrzeugtypen genau gleich. Die dunkelgrüne Linie beschreibt die Maximalverzögerung der Fahrzeuge, welche über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 160 km/h bei genau -3,5 m/s² liegt. Exakt gleich ist der Verlauf der Wunschverzögerung (hellgrün), jedoch mit einer Verzögerung von -2 m/s². Die Wunschbeschleunigung aller acht autonom fahrenden Fahrzeugtypen beträgt bis 80 km/h 2 m/s² und fällt dann bis 160 km/h auf 0 m/s² ab.

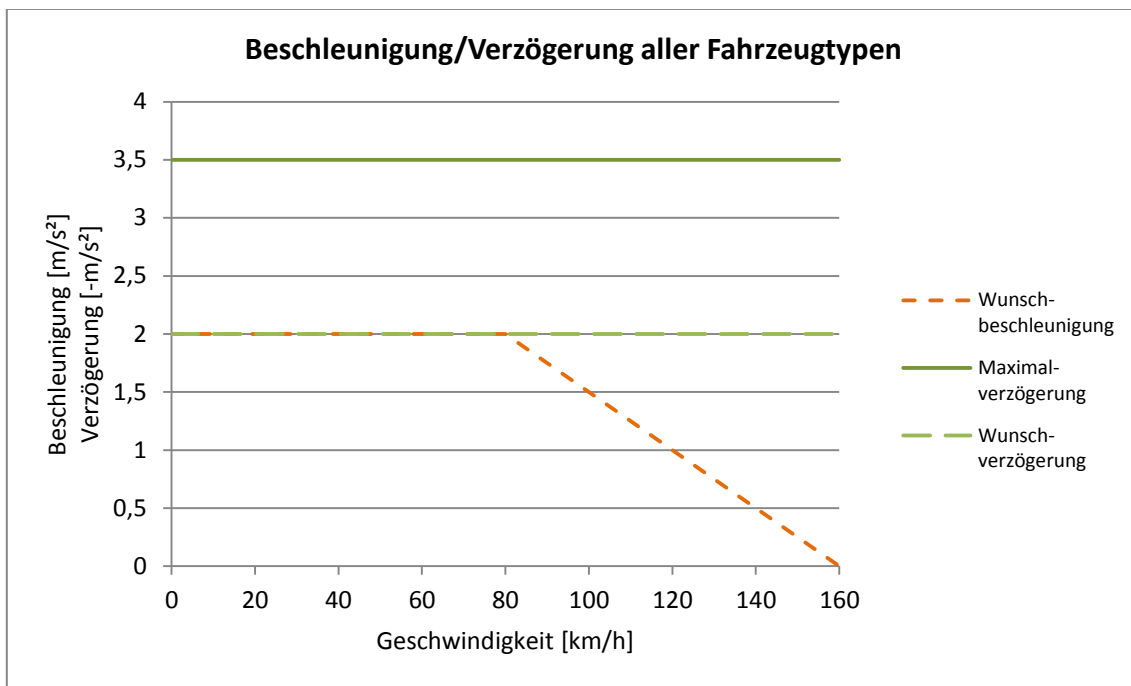


Abbildung 23: Beschleunigungen und Verzögerungen automatisierter Fahrzeuge

6 Leistungsfähigkeitsanalyse am Teilnetz

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ist die Kapazität von vielen Einflussfaktoren (wie zB. Längsneigung, Geschwindigkeit, Streckenführung,...) abhängig und kann durch diese stark beeinflusst werden. Im Zuge der vorliegenden Arbeit soll die mögliche Kapazität (Leistungsfähigkeit) von autonomen Fahrzeugen ermittelt werden. Einflussfaktoren wie Witterung, Tageszeit, Wochentag und Jahreszeiten werden in diesem Fall nicht berücksichtigt und es soll ein optimaler Fahrbahnzustand vorherrschen. Die Kapazität variiert stark aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeit und des Streckenverlaufes (bspw. freie Strecke oder Einmündung einer Strecke auf eine andere). Aufgrund dieser Tatsachen wurden drei unterschiedliche Teilnetze entwickelt, welche in den folgenden drei Unterkapiteln (Kapitel 6.1.1 bis 6.1.3) vorgestellt und beschrieben werden. Um die Kapazität ermitteln zu können, wurde die Zuflussverkehrsstärke immer höher angesetzt, als tatsächlich abgewickelt werden konnte (Nachfrageüberschuss).

6.1 Beschreibung der Teilnetze

Die drei Teilnetze unterscheiden sich hauptsächlich durch die Einmündung anderer Strecken. Während auf dem ersten Teilnetz keine Einmündungen vorhanden sind, mündet in Teilnetz 2 und 3 eine zweite Strecke ein. Die Hauptstrecke, dessen Zufluss im Folgenden als q_H bezeichnet wird, ist eine Vorrangstrecke. Bei der Nebenstrecke (Zufluss wird q_N genannt) handelt es sich um eine Strecke mit Nachrang, welche in die Vorrangstraße einfließt. Ein Überholvorgang ist auf allen Strecken ausgeschlossen. Sie sind nur in eine Richtung befahrbar und weisen je einen Messquerschnitt auf, mithilfe dessen die nachfolgenden Studien und Auswertungen durchgeführt wurden. In Kapitel 6.1.1 bis 6.1.3 werden die verwendeten Teilnetze genauer beschrieben. Die grünen Zahlen in den Abbildungen der Teilnetze stellen die Anzahl der Fahrstreifen dar.

6.1.1 Teilnetz 1 – freie Strecke

Das erste Teilnetz soll die Leistungsfähigkeit von autonomen Fahrzeugen auf einer freien Strecke ohne Einmündung darstellen (siehe Abbildung 24). Der Zufluss der Fahrzeuge (q) erfolgt aus einer Richtung und wird in Fahrzeugen pro Stunde [Fz/h] angegeben. Auf der gesamten Strecke gibt es keine negativen Einflussfaktoren wie Längsneigung, Kurvigkeit oder Hindernisse.

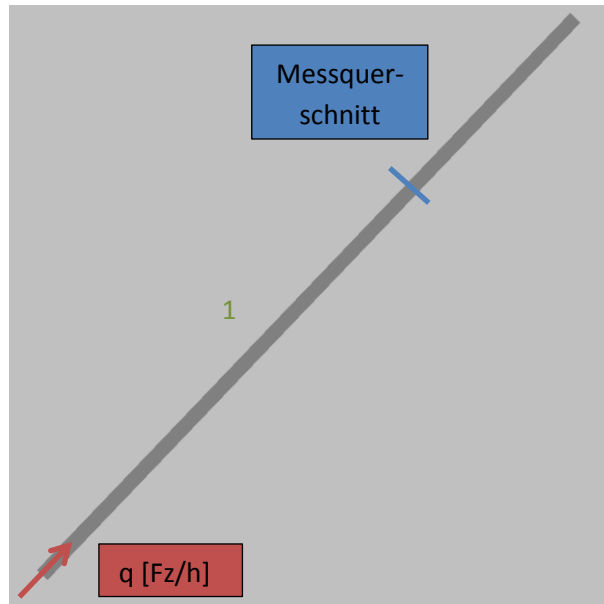


Abbildung 24: Teilnetz 1 – freie Strecke

6.1.2 Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtungsbereich

Das zweite Teilnetz ist in Abbildung 25 zu sehen, auf welchem eine Strecke mit der Einmündung einer nachrangigen Strecke modelliert und untersucht werden soll. Der Vorrang der Einmündung wurde durch Grenzzeitlücken mithilfe einer Querverkehrsstörung geregelt.

Mit dem Messquerschnitt, welcher sich hinter der Einmündung befindet, können die Fahrzeuge der Haupt- (q_H) und der Nebenfahrbahn (q_N) sowie deren Geschwindigkeiten getrennt voneinander ermittelt werden.

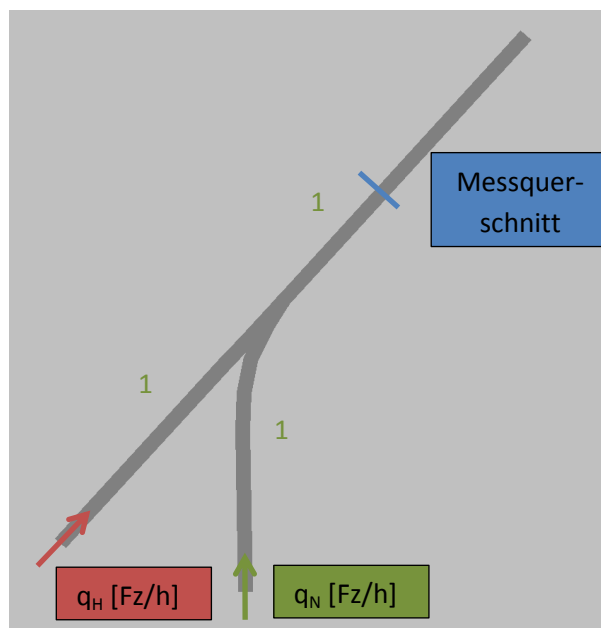


Abbildung 25: Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtungsbereich

6.1.3 Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtungsbereich

Das dritte Teilnetz stellt eine Hauptfahrbahn mit Einmündung einer Nebenfahrbahn dar, auf welchem die Fahrzeuge eine Beschleunigungsstrecke von 80 Metern und eine Verflechtungsstrecke von 40 Metern zur Verfügung haben, um auf die Hauptstrecke mit der gewünschten Geschwindigkeit einbinden zu können (siehe Abbildung 26). Die Modellierung des Beschleunigungsstreifens erfolgte zweistreifig, sodass sich die Fahrzeuge bereits erkennen, jedoch die Fahrbahn noch nicht wechseln können. Auch der Verflechtungsbereich ist zweistreifig ausgebildet, jedoch können hier die Fahrzeuge von der Nebenfahrbahn auf die Hauptfahrbahn wechseln. Der Messquerschnitt liegt wie auch beim Teilnetz 2 hinter der Einmündung und die dort gemessenen Fahrzeuge können unterschieden werden in Fahrzeuge der Haupt- und Nebenfahrbahn. Der Aufbau des dritten Teilnetzes soll jenem entsprechen, welches später am Gesamtnetz bei den Knotenpunkten angewendet wird. Aufgrund der Geometrie der Verflechtungen des Gesamtnetzes befindet sich vor der Beschleunigungsstrecke eine Kurve mit einem Radius von 30 Metern, welche mit 31 km/h befahren werden kann. Dies ergibt sich aus der in der RVS beschriebenen maximalen Seitenbeschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ bei einem Radius von 30 Metern. Durch den Zusammenhang zwischen Seitenbeschleunigung, Radius und Geschwindigkeit ergibt sich aus $v^2 = R \cdot a$ eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 31 km/h. Zu erwähnen ist, dass diese Formel nur für eine Querneigung von 0% zulässig ist. Fünf Meter vor Ende dieser Kurve können die Fahrzeuge mit dem Beschleunigen beginnen.

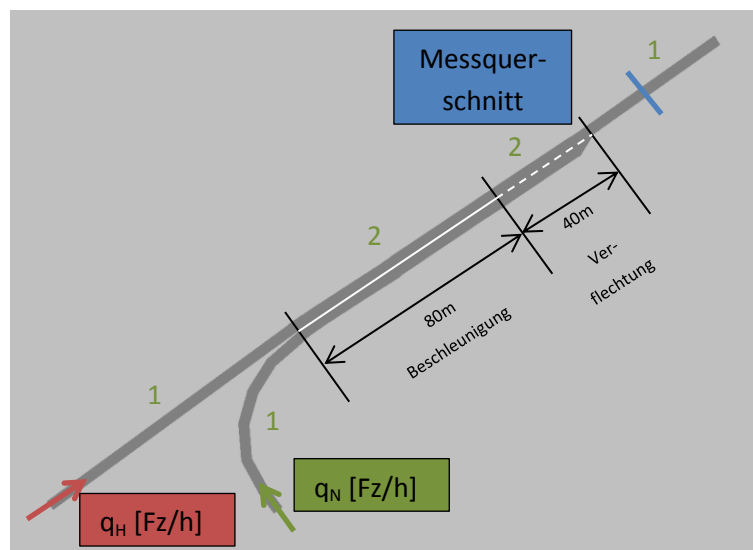


Abbildung 26: Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtungsbereich

6.2 Parameterstudie

Die in die mikroskopische Verkehrssimulation (VISSIM) implementierten Parameter für das Folge- und Fahrstreifenwechselfverhalten (Beschreibung siehe Kapitel 4) von Fahrzeugen, beeinflussen je nach Strecke und Geschwindigkeit die Kapazität auf unterschiedliche Weise. Um feststellen zu können, welche Parameter die Kapazität beeinflussen, wurde an allen drei Teilnetzen eine sogenannte Parameterstudie durchgeführt. Die Teilnetze wurden hierzu mit einem Zufluss versehen, welcher einer Sättigung des Netzes entspricht, es jedoch nicht zu einem Zusammenbruch (sprich Stau) kommt. Die Simulationen der Parameterstudie wurden jeweils für eine Stunde und je

Zusammensetzung mit fünf unterschiedlichen Zufallszahlen mit autonomen Fahrzeugen Typ 4 durchgeführt. Das Hauptaugenmerk der freien Strecke (Teilnetz 1) und der Einmündung ohne Verflechtung (Teilnetz 2) wird auf die Folgeparameter gelegt. Für die Analyse der Einmündung mit Verflechtung (Teilnetz 3) entscheiden die Spurwechselfparameter maßgeblich über die Kapazität.

Bei den autonomen Fahrzeugen wurde bei den Folgeparametern die Abstandsdifferenz (CC2), die positive sowie negative Geschwindigkeitsdifferenz (CC4 und CC5), und der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Oszillation (CC6) auf null gesetzt, da all diese Parameter mit der Oszillation der Geschwindigkeit und somit des menschlichen Fahrverhaltens zusammenhängen, welche bei autonomen Fahrzeugen nicht gegeben ist.

6.2.1 Analyse Teilnetz 1

Auf dem Teilnetz der freien Strecke wurde die Auswirkung der Variation der Folgeparameter (Parameter nach Wiedemann 99 – siehe Kapitel 4.1) genauer untersucht. Dabei wurden die Parameter CC2 und CC4 – CC6 aus bereits genannten Gründen auf null gesetzt. Die Beschleunigungswerte aus dem Stillstand sowie bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h (CC8 und CC9) wurden den Beschleunigungskurven (siehe Kapitel 5.2.1) mit 2 m/s^2 angepasst. Die zu variierenden Parameter beschränkten sich somit auf den Stillstandsabstand (CC0), den Folgeabstand (CC1) und den Beginn des Verzögerungsvorganges (CC3). In Tabelle 6.1 sind noch einmal alle Folgeparameter, welche für die Analyse der Parameterstudie des ersten Teilnetzes verwendet wurden, aufgezeichnet.

Tabelle 6.1: Folgeparameter Teilnetz 1 – freie Strecke

Parameter	Beschreibung	Standardeinstellung VISSIM	Teilnetz 1	Einheit
CC0	Stillstandsabstand	1,50	variabel	m
CC1	zeitlicher Folgeabstand	0,90	variabel	s
CC2	Abstandsdifferenz (Längsoszillation)	4,00	0	m
CC3	Wahrnehmungsschwelle für Folgen/ Beginn Verzögerungsvorgang	-8,00	variabel	s
CC4	negative Geschwindigkeitsdifferenz	-0,35	0	m/s
CC5	positive Geschwindigkeitsdifferenz	0,35	0	m/s
CC6	Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation	11,44	0	-
CC7	Beschleunigung bei Oszillation	0,25	2	m/s^2
CC8	Beschleunigung aus Stillstand	3,50	2	m/s^2
CC9	Beschleunigung bei 80 km/h	1,50	2	m/s^2

Der Zufluss der Strecke (q) wurde mit 4000 Fahrzeugen pro Stunde festgelegt wobei die Simulation mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt wurde (30, 50 und 80 km/h).

Die Variation der Parameter sowie deren Auswirkungen sind in Tabelle 6.2 ersichtlich, wobei q_{Ges} die tatsächlich den Messquerschnitt passierenden Fahrzeuge angibt. In fett gedruckt sind jeweils die höchsten gemessenen Verkehrsstärken je Geschwindigkeit dargestellt.

Tabelle 6.2: Parameterstudie Teilnetz 1 – freie Strecke

Folgeparameter		v = 30 km/h						
CC0	[m]	1.5					0.5	
CC1	[s]	0.5	0.9	1.3	0.9		0.5	
CC3	[s]	-4		-2	-5	-8	-4	
q _{Ges}	[Fz/h]	2008	2008	1885	2008	2008	2008	2009

Folgeparameter		v = 50 km/h						
CC0	[m]	1.5					0.5	
CC1	[s]	0.5	0.9	1.3	0.9		0.5	
CC3	[s]	-4		-2	-5	-8	-4	
q _{Ges}	[Fz/h]	2791	2791	2159	2791	2791	2791	2788

Folgeparameter		v = 80 km/h						
CC0	[m]	1.5					0.5	
CC1	[s]	0.5	0.9	1.3	0.9		0.5	
CC3	[s]	-4		-2	-5	-8	-4	
q _{Ges}	[Fz/h]	3721	3117	3116	3116	3116	3116	3715

Die Untersuchung der Auswirkung des Stillstandsabstandes (CC0) auf die Kapazität erfolgte mit 0,5 und 1,5 Metern. Diese Variation zeigte keinerlei Einfluss auf die Kapazität. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge bei diesem Teilnetz nie zum Stillstand kommen um anschließend wieder anzufahren.

Der Folgeabstand (CC1) hingegen spielt eine wesentliche Rolle in der Kapazitätsmaximierung. Die Simulation wurde mit zeitlichen Folgeabständen von 0,5 Sekunden, 0,9 Sekunden und 1,3 Sekunden durchgeführt und zeigte bei 30 und 50 km/h die größte Verkehrsstärke bei 0,5 sowie 0,9 Sekunden zeitlichen Folgeabstandes. Bei 80 km/h wurde die höchste Verkehrsstärke mit einem zeitlichen Folgeabstand von 0,5 Sekunden verzeichnet.

Bei 30 km/h wird zwischen 0,9 und 1,3 Sekunden zeitlichen Folgeabstandes eine Fahrzeugdifferenz von 123 Fahrzeugen gemessen, dies entspricht einer Steigerung der Verkehrsstärke um 6%, bei 50 km/h sind es schon 572 Fahrzeuge, welches einer Differenz von 21% entspricht. Bei 80 km/h liegt die Differenz zwischen 0,5 und 0,9 Sekunden zeitlichen Folgeabstandes bei 604 Fahrzeugen und somit 16% Abweichung (siehe Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Differenz der Verkehrsstärke bei Änderung des zeitlichen Folgeabstands (CC1)

Geschw. [km/h]	CC1		Absolute Differenz	Relative Differenz
	0.9 s	1.3 s		
30	2008 Fz/h	1885 Fz/h	-123 Fz/h	6%
50	2731 Fz/h	2159 Fz/h	-572 Fz/h	21%
80	3721 Fz/h	3117 Fz/h	-604 Fz/h	16%

Der Beginn des Verzögerungsvorganges wurde zwischen -2 und -8 Sekunden gemessen und zeigte keine Auswirkung auf die Verkehrsstärke.

Bei Veränderung der Geschwindigkeit zeigt die Parameterstudie zwar Unterschiede in der Verkehrsstärke, jedoch ist zu erkennen, dass je Geschwindigkeitsstufe auch die gleichen Parameter für das Erhöhen der Verkehrsstärke verantwortlich sind und aufgrund dieser Tatsache, werden die weiteren Parameterstudien des zweiten und dritten Teilnetzes nur noch bei einer Geschwindigkeit durchgeführt.

6.2.2 Analyse Teilnetz 2

Die Spurwechselfparameter spielen in diesem Teilnetz keine Rolle, da es keinen Verflechtungsbereich gibt, bei dem sich die Fahrzeuge des Nebenstroms einordnen können. Der Stillstandsabstand (CC0) wurde auf 0,5 Meter herabgesetzt. Ein Folgeabstand (CC1) von 0,5 Sekunden erzielte im ersten Teilnetz die größte Kapazität, weswegen dieser auch in Teilnetz 2 übernommen wurde. Die Folgeparameter von Wiedemann 99 und wie diese in Teilnetz 2 verwendet wurden, zeigt Tabelle 6.4.

Tabelle 6.4: Folgeparameter Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtung

Parameter	Beschreibung	Standardeinstellung VISSIM	Teilnetz 2	Einheit
CC0	Stillstandsabstand	1,50	0,5	m
CC1	zeitlicher Folgeabstand	0,90	0,5	s
CC2	Abstandsdifferenz (Längsoszillation)	4,00	0	m
CC3	Wahrnehmungsschwelle für Folgen/ Beginn Verzögerungsvorgang	-8,00	variabel	s
CC4	negative Geschwindigkeitsdifferenz	-0,35	0	m/s
CC5	positive Geschwindigkeitsdifferenz	0,35	0	m/s
CC6	Einfluss der Geschwindigkeit auf Oszillation	11,44	0	-
CC7	Beschleunigung bei Oszillation	0,25	2	m/s ²
CC8	Beschleunigung aus Stillstand	3,50	2	m/s ²
CC9	Beschleunigung bei 80 km/h	1,50	2	m/s ²

Ähnlich dem Teilnetz 1 wurden auch hier verschiedene Fahrverhaltensparameter variiert. Zu den Parametern von Wiedemann 99 kommen hierzu noch die Folgeparameter der maximalen Vorausschauweite in Meter und Fahrzeugen. Tabelle 6.5 zeigt die Variation dieser insgesamt drei Folgeverhaltensparameter und deren Auswirkung auf die Kapazität beim Teilnetz der Einmündung ohne Verflechtung.

Tabelle 6.5: Parameterstudie Teilnetz 2 – Einmündung ohne Verflechtung

Folgeparameter		$v_H = v_N = 80 \text{ km/h}$						
VSW _{Max}	[m]	150	250				500	
VSW _{Fz}	[# Fz]	10	4	10			4	10
CC3	[s]	-4	-4	-10	-15	-4		
q _{Ges}	[Fz/h]	2306	2259	2303	2377	2371	2248	2288

Das Hauptaugenmerk lag beim Teilnetz 2 auf der Vorausschauweite in Meter (VSW_{Max}) und in Fahrzeugen (VSW_{Fz}), sowie beim Beginn des Verzögerungsvorganges (CC3). Dazu wurde der Hauptzufluss mit 2000 Fz/h und der Nebenzufluss mit 500 Fz/h geregelt. Die Parameterstudie bei der

Strecke mit Einmündung ohne Verflechtung wurde mit *aut4* sowie einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf Haupt- und Nebenfahrbahn durchgeführt.

Die Variation der Folgeparameter zeigte die höchste gemessene Verkehrsstärke (q_{Ges}) bei einer Vorausschauweite von 250 Meter und 10 Fahrzeugen sowie dem Beginn des Verzögerungsvorganges von -10 Sekunden.

Die gemessene Verkehrsstärke kann jedoch nicht als allgemeine Aussage über die Kapazität angesehen werden, da diese stark von den Anteilen der Verkehrsstärke an Haupt- und Nebenstrom abhängt. In Kapitel 6.4 wird genauer auf diese Problematik und deren Lösung eingegangen.

6.2.3 Analyse Teilnetz 3

Die Parameterstudie des dritten Teilnetzes (Einmündung mit Verflechtung) beschäftigt sich mit der Variation der Spurwechselparameter, welche auf der freien Strecke und bei einer Einmündung ohne Verflechtungsbereich keinen Einfluss haben. Die Simulation wurde mit einem Zufluss von 1250 Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und 1000 Fahrzeugen pro Stunde auf der Nebenfahrbahn durchgeführt, wobei der Faktor für den reduzierten Sicherheitsabstand während des Einfädelungsvorganges zwischen 40% und 80% und die Verzögerung für das kooperative Bremsen zwischen -2,5 und -3,0 m/s² variiert wurden. Diese Parameterstudie wurde mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf Haupt- und Nebenfahrbahn ausgeführt.

Tabelle 6.6: Parameterstudie Teilnetz 3 – Einmündung mit Verflechtung

Fahrstreifenwechselparameter		$v_H = v_N = 50 \text{ km/h}$						
S_{iRed}	-	0.4			0.6			0.8
$BremS_{Koop}$	[m/s ²]	-2.5	-3	-3.5	-2.5	-3	-3.5	-3
q_{Ges}	[Fz/h]	2190	2150	2139	2132	2134	2144	2113

Wie in Tabelle 6.6 gezeigt, steigt der maximal mögliche Verkehrsfluss bei Reduktion des reduzierten Sicherheitsabstandes und mit geringerer Verzögerung durch kooperatives Bremsen. Der Verkehrsfluss ist mit einem reduzierten Sicherheitsfaktor von 0,4 und mit -2,5 m/s² Verzögerung am höchsten. Diese Werte werden somit für die weiteren Studien herangezogen.

6.3 Kapazität auf freier Strecke

Die Parameterstudie auf Teilnetz 1 (freie Strecke) zeigte, dass bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h eine Kapazität von etwa 2000 autonomen Fahrzeugen (*aut4*) pro Stunde erreicht werden kann. Mit 50 km/h steigt die Kapazität auf 2800 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen an und mit 80 km/h kann eine Kapazität von bis zu 3700 Fahrzeugen pro Stunde gemessen werden. Diese Werte können direkt aus der Parameterstudie von Teilnetz 1 (siehe Kapitel 6.2.1) herangezogen werden, da es hier keinen Einfluss durch einen zweiten veränderlichen Zufluss gibt.

Die Studie wurde nun erweitert und mit anderen Fahrzeugtypen bzw. -systemen durchgeführt. Als Testobjekte wurden das autonome Fahrzeug 5, Podcar 3 sowie ein Mischsystem, welche in Kapitel 5.2 beschreiben wurden, eingesetzt. Zum Vergleich wurden auch konventionelle Fahrzeuge getestet. Die Durchführung der Simulation erfolgte mit einem Zufluss von 4000 Fahrzeugen pro Stunde.

In Tabelle 6.7 sind die Kapazitäten (q_{Max}) je Geschwindigkeit und je Fahrzeugtyp aufgelistet, sowie die prozentuelle Abweichung ($\text{Anteil}_{\text{aut4}}$) bezogen auf die Kapazität des Fahrzeugtyps *aut4*.

Es stellte sich heraus, dass das autonome Fahrzeug 5 und das Podcar 3 die gleichen Ergebnisse erzielten, da die Längen der Fahrzeuge gleich sind und der Faktor der Maximalbeschleunigung, welcher diese beiden Fahrzeugtypen maßgeblich unterscheidet, hier nicht zum Tragen kommt.

Tabelle 6.7: Kapazität auf freier Strecke bei 30, 50 und 80 km/h

Fahrzeugtyp	30 km/h		50 km/h		80 km/h	
	q_{Max} [Fz/h]	$\text{Anteil}_{\text{aut4}}$	q_{Max} [Fz/h]	$\text{Anteil}_{\text{aut4}}$	q_{Max} [Fz/h]	$\text{Anteil}_{\text{aut4}}$
aut4	2008	100%	2791	100%	3721	100%
aut5 \triangleq pod3	1658	83%	2375	85%	3256	88%
misch	1889	94%	2649	95%	3570	96%
konv	1831	91%	2293	82%	2149	58%

Bei 30 km/h kann bei autonomen Fahrzeugen 5 und Podcars 3 eine Kapazität von bis zu 1660 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen erreicht werden, dies entspricht etwa 83% der möglichen Kapazität von autonomen Fahrzeugen 4 (2000 Fz/h \triangleq 100%). Durch eine Mischung aller Fahrzeugtypen sind Kapazitäten von 1890 Fahrzeugen pro Stunde möglich. Mit konventionellen Fahrzeugen konnte eine Kapazität von 1830 Fahrzeugen pro Stunde erreicht werden, welches 91% der durch Automatisierung möglichen Leistungsfähigkeit entspricht.

Außerdem ist dieser Tabelle zu entnehmen, dass bei 50 km/h eine Kapazität von knapp 2800 Fahrzeugen (*aut4*) erreicht wird. Mit *aut5* sind immer noch 85% dieser Kapazität möglich und bei Mischsystemen sogar bis zu 95%. Bei konventionellen Fahrzeugen hingegen sinkt die Kapazität in Bezug auf autonome Fahrzeuge 4 um 18%. Je höher die Geschwindigkeit, desto mehr unterscheiden sich autonome und konventionelle Fahrzeuge hinsichtlich ihrer möglichen Kapazität.

Bei 80 km/h zeigt sich, dass mit Mischsystemen annähernd die gleichen Kapazitäten erreicht werden können wie mit dem autonomen Fahrzeug 4. Autonome Fahrzeuge 5 und Podcars 3 erreichen etwa 88% der maximal möglichen Kapazität von 3700 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen bei dieser Geschwindigkeitsstufe. Bei konventionellen Fahrzeugen wird der Unterschied in der Kapazität zu autonomen Fahrzeugen immer deutlicher erkennbar.

Durchschnittlich fällt also die Kapazität bei Änderung der Fahrzeugtypen von *aut4* auf *aut5* bzw. *pod3* um etwa 15%. Beim Mischsystem mit autonomen Fahrzeugen und Podcars ist die Kapazität bezogen auf *aut4* nur um 5% geringer.

Umgekehrt kann auch gesagt werden, dass die Kapazität einer freien Strecke durch autonome Fahrzeuge bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen um 73% gesteigert werden kann (siehe Tabelle 6.8). Bei 50 km/h entspricht die Kapazitätssteigerung 22% und bei 30 km/h 10%.

Tabelle 6.8: Kapazitätssteigerung auf freier Strecke

Fahrzeugtyp	30 km/h		50 km/h		80 km/h	
	q_{Max} [Fz/h]	Abw	q_{Max} [Fz/h]	Abw	q_{Max} [Fz/h]	Abw
aut4	2008	110%	2791	122%	3721	173%
aut5 \triangleq pod3	1658	91%	2375	104%	3256	152%
misch	1889	103%	2649	116%	3570	166%
konv	1831	100%	2293	100%	2149	100%

Die gemessene Geschwindigkeit beträgt bei konventionellen Fahrzeugen bei einer Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h nur etwa 63 km/h. Dies ist zurückzuführen auf das menschliche Fahrverhalten und der damit einhergehenden Oszillation der Geschwindigkeit während des Fahrens.

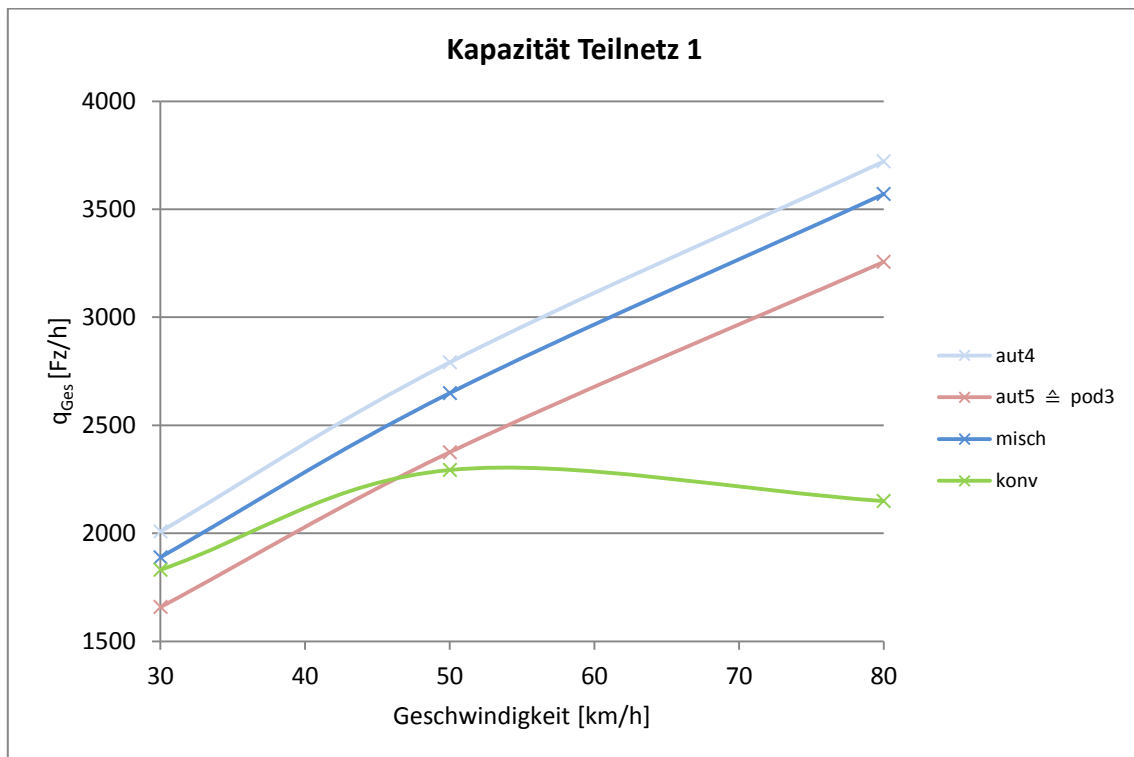


Abbildung 27: Kapazität in Abhängigkeit der Geschwindigkeit auf freier Strecke

Während bei autonomen Fahrzeugen die Kapazität mit steigender Wunschgeschwindigkeit nahezu linear zunimmt, tritt bei konventionellen Fahrzeugen die höchste Kapazität bei etwa 55 km/h auf und nimmt dann mit steigender Geschwindigkeit wieder ab (siehe Abbildung 27).

Auf zweistreifigen Autobahnen sind Kapazitäten von bis zu 2000 Fahrzeugen pro Stunde und Fahrstreifen möglich (vgl. Kapitel 3.2.1). Außerdem zeigen Messungen, dass die Kapazität in der Realität erst bei einer Geschwindigkeit von etwa 70 km/h abnimmt. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um Simulationen handelt und diese nicht immer zu 100% der Realität entsprechen können.

6.4 Kapazität bei Einmündungen ohne Verflechtungsbereich

Bei der Einmündung ohne Verflechtung handelt es sich um das vorher beschriebene Teilnetz 2.

Die in der Parameterstudie gemessene Verkehrsstärke (für Teilnetz 2 und 3) kann nicht als allgemeine Aussage über die Kapazität einer Strecke angesehen werden, da diese stark von den Zuflüssen der Einmündungen abhängig ist. Deshalb wurden wie nachfolgend beschrieben, für die Ermittlung der Kapazität unterschiedliche Zusammensetzungen der Verkehrsstärke auf Haupt- und Nebenfahrbahn untersucht und diese als Funktionsverläufe dargestellt. Die Zuflussverkehrsstärke war in Summe immer höher als die gemessene Kapazität im Abfluss, das heißt, es gab einen ständigen Nachfrageüberschuss. Je Zusammensetzung von Haupt- zu Nebenstrom wurde ein Optimum an Fahrzeugüberschuss ermittelt, um einen durchgehenden Stau zu vermeiden. Diese ist außerdem abhängig von der zulässigen Geschwindigkeit, da bei höheren Geschwindigkeiten höhere Kapazitäten möglich sind (vgl. Kapitel 6.3).

Um die Kapazität je Zusammensetzung von Haupt- zu Nebenstrom ermitteln zu können, wurden je Simulationsstunde die Zuflüsse variiert und die Simulation mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf Haupt- und Nebenstrom durchgeführt (siehe Tabelle 6.9). Dabei wurde eine Vorlaufzeit von 300 Sekunden gewählt.

Tabelle 6.9: Anzahl der Fahrzeuge je Simulationsstunde und Geschwindigkeit

Simulationszeit		Geschw q_H = Geschw q_N								Geschw q_H = 80 km/h Geschw q_N = 50, 60, 70 km/h	
		30 km/h		50 km/h		65 km/h		80 km/h			
von Sekunde	bis Sekunde	q_H	q_N	q_H	q_N	q_H	q_N	q_H	q_N	q_H	q_N
300	3900	2200	0	3000	0	3500	0	4000	0	4000	0
3900	7500	2000	100	2500	250	3200	100	3500	200	3500	50
7500	11100	2000	50	2500	200	3200	50	3500	150	3500	30
11100	14700	2000	25	2500	150	3000	150	3500	50	3000	130
14700	18300	1500	500	2500	100	3000	120	3500	25	3000	120
18300	21900	1500	450	2000	350	2500	300	3000	300	2500	250
21900	25500	1500	400	2000	300	2500	250	3000	200	2500	230
25500	29100	1500	350	2000	250	2500	230	3000	150	2000	450
29100	32700	1500	300	1500	650	2000	500	3000	100	2000	430
32700	36300	1000	1100	1500	600	2000	450	2500	500	1500	730
36300	39900	1000	1050	1500	550	2000	400	2500	450	1500	700
39900	43500	1000	1000	1500	500	1500	750	2500	400	1000	1300
43500	47100	1000	950	1000	1300	1500	700	2500	350	1000	1250
47100	50700	500	2000	1000	1200	1500	650	2500	300	1000	1200
50700	54300	500	1900	1000	1150	1000	1300	2500	250	500	2300
54300	57900	500	1850	1000	1100	1000	1200	2500	200	500	2200
57900	61500	500	1800	1000	1000	500	2400	2000	550	500	2150
61500	65100	0	2200	500	2500	500	2300	2000	500	0	4000
65100	68700			500	2400	500	2200	2000	450		
68700	72300			500	2300	0	3500	2000	400		
72300	75900			500	2200			2000	350		
75900	79500			500	2100			1500	800		
79500	83100			500	2050			1500	750		
83100	86700			500	2000			1500	700		
86700	90300			0	3000			1500	650		
90300	93900							1500	600		
93900	97500							1500	550		
97500	101100							1500	500		
101100	104700							1000	1500		
104700	108300							1000	1250		
108300	111900							1000	1200		
111900	115500							1000	1100		
115500	119100							1000	1000		
119100	122700							500	2500		
122700	126300							500	2200		
126300	129900							500	2100		
129900	133500							500	2000		
133500	137100							0	4000		

Mithilfe eines Messquerschnittes nach der Einmündung konnte die Verkehrsstärke, unterteilt in Fahrzeuge des Haupt- und Nebenstroms, sowie deren Geschwindigkeit gemessen werden. Diese Messpunkte wurden in ein Diagramm übertragen, welche auf der Abszisse die Fahrzeuge auf der Nebenfahrbahn (q_N) und auf der Ordinate die Fahrzeuge der Hauptfahrbahn (q_H) einerseits und die Gesamtverkehrsstärke (q_{Ges}) andererseits darstellt. Die blauen Messpunkte und deren polynome Regressionskurve dritten bzw. vierten Grades beschreiben den Kapazitätsanteil von Haupt- und Nebenstrom. Die roten Messpunkte und die dazu gehörige polynome Regressionskurve dritten bzw. vierten Grades spiegeln die Gesamtverkehrsstärke ($q_{Ges} = q_H + q_N$) je Anteil der Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn (q_H) wider. Die Analyse wurde sowohl mit autonomen Fahrzeugen des Typs 4 und 5 als auch mit Podcars des Typs 3 und konventionellen Fahrzeugen durchgeführt und die Auswertung und der Vergleich werden nachfolgend beschrieben.

Die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit entspricht bei den autonomen Fahrzeugen und den Podcars den Wunschgeschwindigkeiten. Bei den konventionellen Fahrzeugen jedoch fällt die tatsächlich gefahrene und gemessene Geschwindigkeit am Messquerschnitt bei einer Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h um etwa 25% ab.

Die Ergebnisse von autonomen Fahrzeug Typ 5 und Podcar Typ 3 sind wie schon bei Teilnetz 1 (siehe Kapitel 6.1.1) beschrieben identisch und werden somit nicht mehr separat angegeben.

Exemplarisch sind folgend die Diagramme der autonomen Fahrzeuge des Typs 4 sowie der konventionellen Fahrzeuge als Vergleich gezeigt, alle restlichen Diagramme können dem Anhang entnommen werden.

Autonomes Fahrzeug Typ 4

Im Falle einer niedrigen Geschwindigkeit von 30 km/h fällt auf, dass bei hoher Verkehrsstärke auf der Nebenfahrbahn und gleichzeitig geringer Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn die Gesamtkapazität höher ist, als wenn auf der Hauptfahrbahn kein Verkehr herrscht. Dieses Phänomen lässt sich aufgrund der reduzierten Sicherheitsabstände während des Einmündungsvorganges erklären (siehe Abbildung 28). Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h ist die Gesamtkapazität (rot) am geringsten (ca. 1850 Fz/h) bei etwa 1400 Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und 450 Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn. Dies entspricht einem Verhältnis von $q_H:q_N = 3,1:1$.

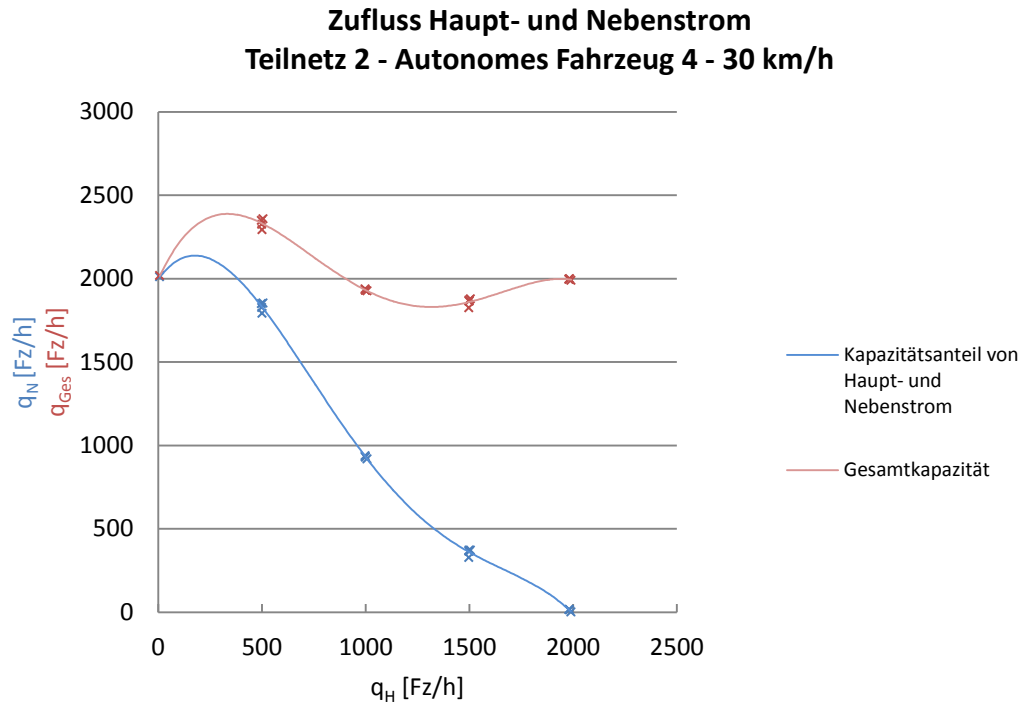


Abbildung 28: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h

Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h auf Haupt- und Nebenfahrbahn ist ersichtlich, dass mit sinkendem Zufluss auf der Nebenfahrbahn die Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn relativ konstant ansteigen kann (zwischen $q_H = 0$ bis 1500 Fz/h). Die geringste Gesamtkapazität von etwa 1950 Fahrzeugen pro Stunde tritt bei einer Verkehrsstärke von 1500 Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und 450 Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn auf.

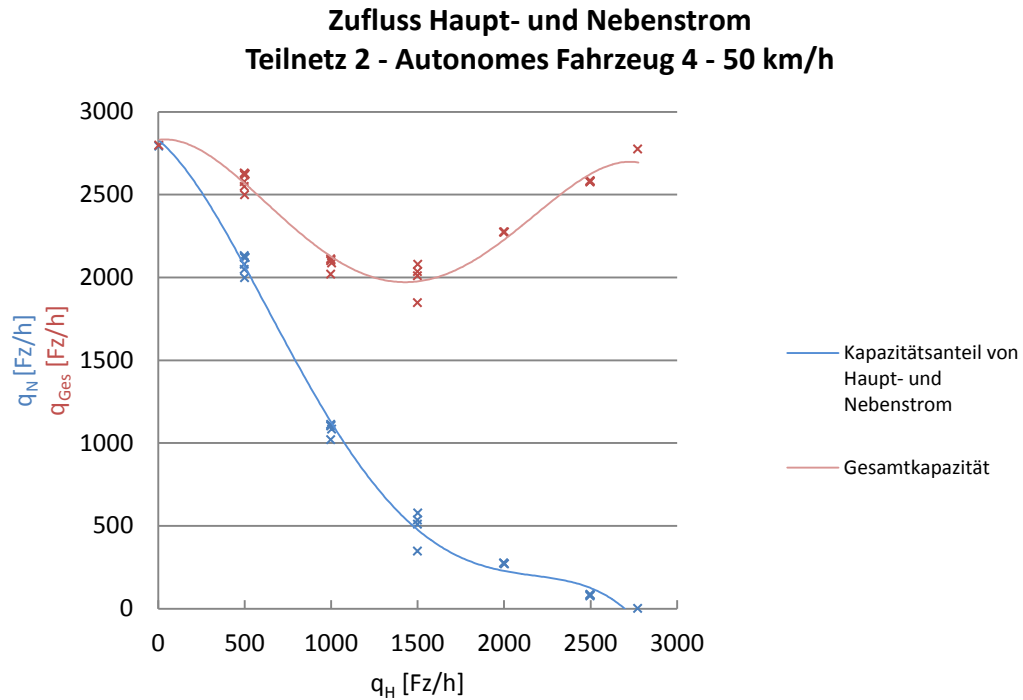


Abbildung 29: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h

Bei 65 km/h ist erkennbar, dass die Gesamtkapazität bei einem Zufluss von etwa 1500 Fahrzeugen pro Fahrstreifen und Stunde auf der Hauptfahrbahn und 700 Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn insgesamt am geringsten (etwa 2200 Fz/h) ist.

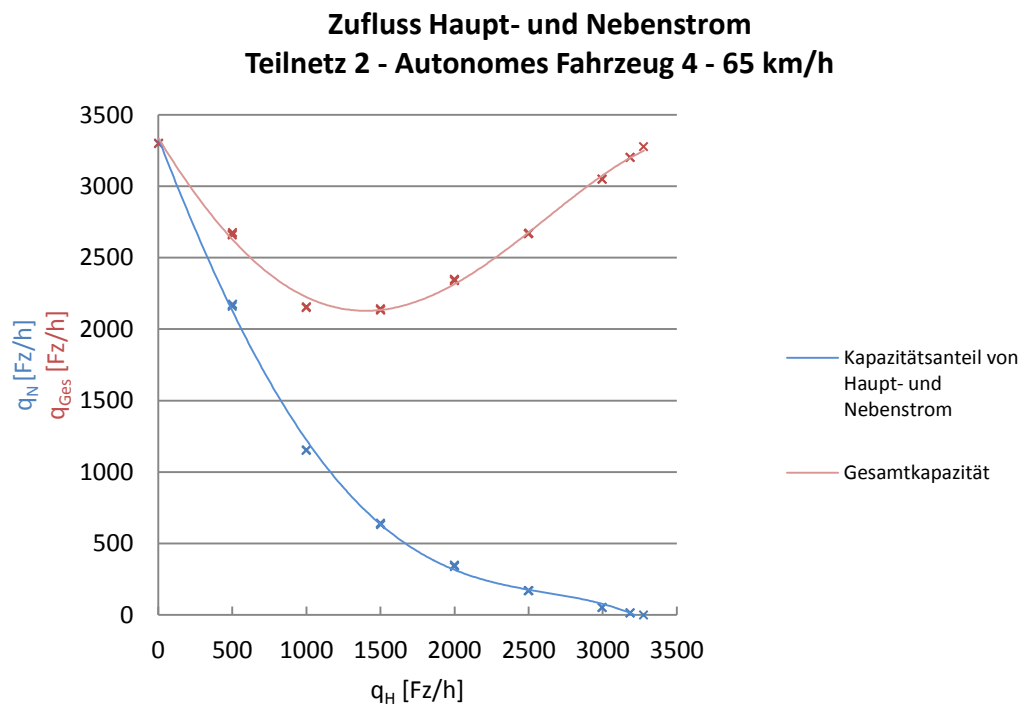


Abbildung 30: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 65$ km/h

Obwohl die Hauptfahrbahn (bei $q_N = 0$) bei 80 km/h etwa 400 Fahrzeuge pro Stunde mehr aufnehmen kann als bei einer Geschwindigkeit von 65 km/h, zeigt sich eine Ähnlichkeit der geringsten Gesamtkapazität welche bei beiden Geschwindigkeiten (65 und 80 km/h) etwa 2200 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen beträgt.

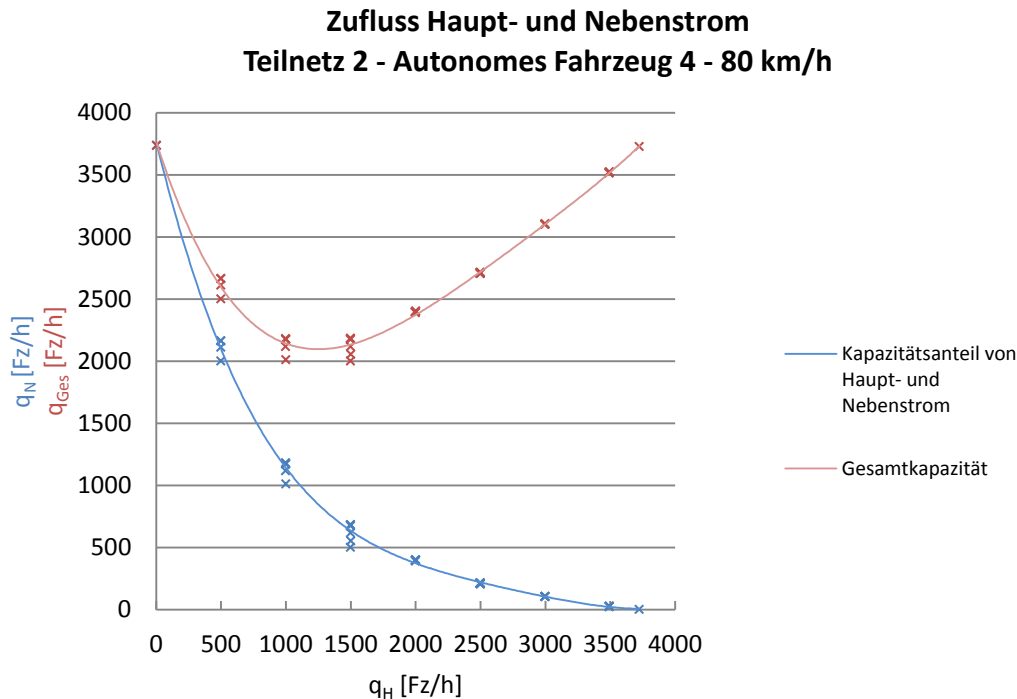


Abbildung 31: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h

Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Verhältnisse von Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn zu Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn. Die Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h und die Fahrzeuge auf der Nebenfahrbahn fahren mit 50 km/h auf die Hauptfahrbahn ein, um auf dieser dann auf 80 km/h zu beschleunigen. Wenn auf die Hauptfahrbahn anfangs nur Fahrzeuge aus der Nebenfahrbahn einfahren, ist eine Kapazität von etwa 3000 Fahrzeugen pro Stunde zu verzeichnen. Die Kapazität auf freier Strecke bei 50 km/h beträgt in etwa 2700 Fahrzeuge pro Stunde, doch da der Messquerschnitt etwas weiter von der Einmündung entfernt liegt, haben hier die Fahrzeuge von der Nebenfahrbahn schon auf 66 km/h beschleunigt. Fließen Fahrzeuge ausschließlich auf der Hauptfahrbahn zu und keine auf der Nebenfahrbahn so beläuft sich die Kapazität des Fahrstreifens auf etwa 3700 Fahrzeuge pro Stunde. Das Leistungsfähigkeitsminimum liegt hier bei etwa 2200 Fahrzeugen, wobei 1200 Fahrzeuge von der Hauptfahrbahn und 1000 Fahrzeuge von der Nebenfahrbahn kommen, dies entspricht einer Zusammensetzung von $q_H:q_N = 1,2:1$.

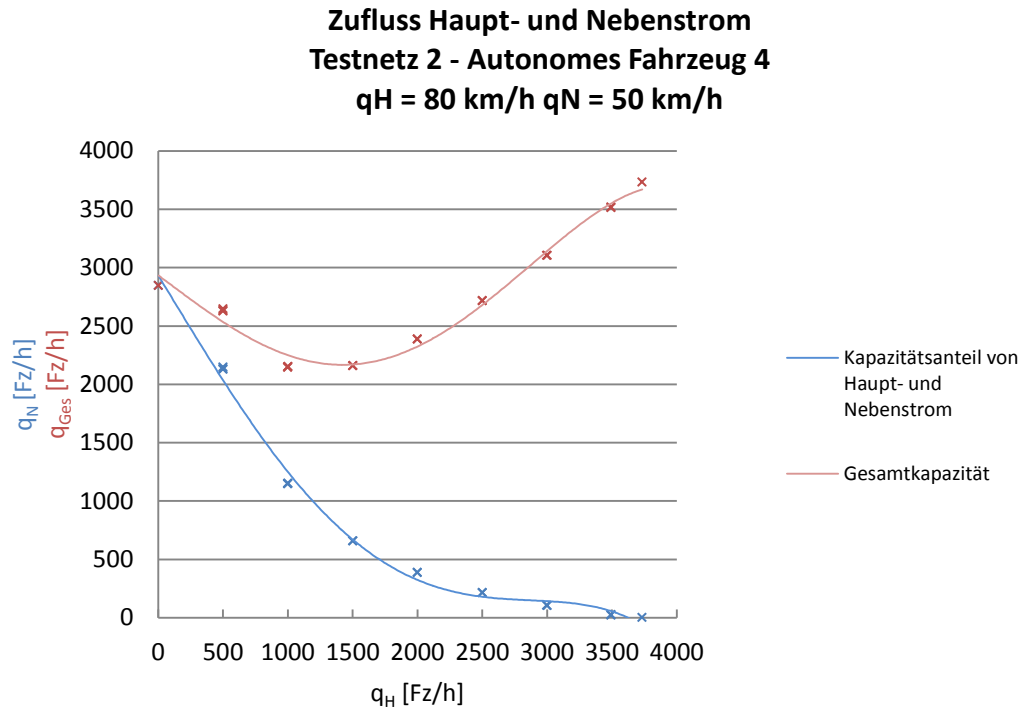


Abbildung 32: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80 \text{ km/h}$, $q_N = 50 \text{ km/h}$

Bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf der Nebenfahrbahn auf 60 km/h steigt auch die Kapazität bei 100% Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn auf rund 3200 Fahrzeuge pro Stunde und Fahrstreifen an (gefahrte Geschwindigkeit am Messquerschnitt = 74 km/h). Die Kapazität bei 100% Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn bleibt mit 3700 Fahrzeugen pro Stunde unverändert. Das Verhältnis $q_H:q_N$ bei der die Kapazität insgesamt am geringsten ist, befindet sich bei etwa 1400:800 Fahrzeugen ($q_{Ges} = 2200$ Fahrzeuge pro Stunde, siehe Abbildung 33).

**Zufluss Haupt- und Nebenstrom
Testnetz 2 - Autonomes Fahrzeug 4
 $q_H = 80 \text{ km/h}$ $q_N = 60 \text{ km/h}$**

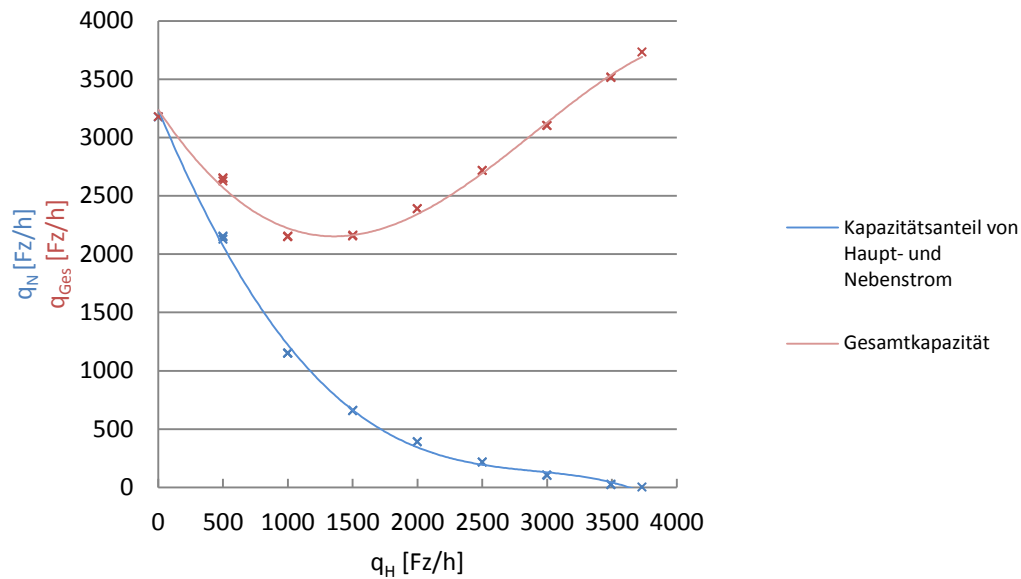


Abbildung 33: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80 \text{ km/h}$, $q_N = 60 \text{ km/h}$

Können die Fahrzeuge der Nebenfahrbahn mit 70 km/h auf die Hauptfahrbahn auffahren, so erhöht sich die Kapazität bei 100% Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn auf bis zu 3500 Fahrzeugen pro Stunde. Auch hier bleibt die Kapazität bei 100% Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn bei 3700 Fahrzeugen pro Stunde. Die geringste Verkehrsstärke ($q_{Ges} = 2200 \text{ Fz/h}$) zeigt sich bei einem Verhältnis von $q_H:q_N = 1400:800$ Fahrzeugen.

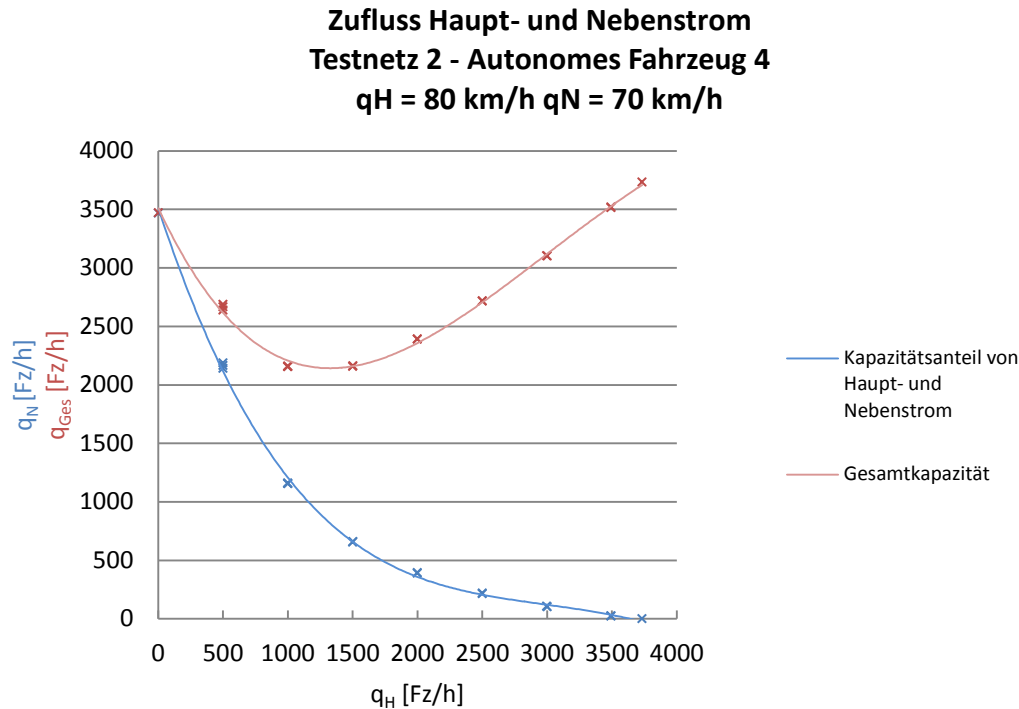


Abbildung 34: Teilnetz 2 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80 \text{ km/h}$, $q_N = 70 \text{ km/h}$

Zusammenfassend für autonome Fahrzeuge des Typs 4 kann gesagt werden, dass das Maximum der Kapazität immer dort vorherrscht, wo die meisten Fahrzeuge von nur einer Fahrbahn kommen (sprich freie Strecke). Die Kapazität sinkt sobald ein Zufluss einer anderen Strecke vorhanden ist.

Bei geringen Geschwindigkeiten liegt die geringste Kapazität bei einem Verhältnis von $q_H:q_N$ bei etwa 3:1, dieses Verhältnis sinkt mit steigender Geschwindigkeit auf bis zu 1,6:1. Die genaue Auflistung der Verhältnisse von $q_H:q_N$ bei denen die Gesamtkapazität ein Minimum erreicht zeigt Tabelle 6.10.

Tabelle 6.10: Minimum der Gesamtkapazität je Geschwindigkeit

Fahrzeug- typ	Geschwindigkeit		Anzahl der Fahrzeuge			Verhältnis
	v_H [km/h]	v_N [km/h]	q_H [Fz/h]	q_N [Fz/h]	q_{Ges} [Fz/h]	$q_H : q_N$
aut4	30	30	1400	450	1850	3.1 : 1.0
	50	50	1500	450	1950	3.3 : 1.0
	65	65	1500	700	2200	2.1 : 1.0
	80	50	1200	1000	2200	1.2 : 1.0
	80	60	1400	800	2200	1.8 : 1.0
	80	70	1400	800	2200	1.8 : 1.0
	80	80	1350	850	2200	1.6 : 1.0

Es wäre also ratsam, tendenziell immer mehr Fahrzeuge von der Nebenfahrbahn einfahren zu lassen als von der Hauptfahrbahn. Dies liegt an der Tatsache, dass die Fahrzeuge, welche von der Nebenfahrbahn kommen, den Sicherheitsabstand für die Zeit des Einmündungsvorganges unterschreiten können und so die Verkehrsdichte auf der Fahrbahn insgesamt erhöhen.

Konventionelles Fahrzeug

Die Analyse mit ausschließlich konventionellen Fahrzeugen zeigte schon auf der freien Strecke deutlich geringere Kapazitäten als mit autonomen Fahrzeugen, so auch bei der Einmündung ohne Verflechtung. Mit den konventionellen Fahrzeugen wurden die gleichen Studien durchgeführt wie mit dem autonomen Fahrzeug Typ 4. Zusätzlich befindet sich im Diagramm die tatsächlich gefahrene, mittlere Geschwindigkeit am Messquerschnitt (grün), da sich diese – vor allem bei hohen Geschwindigkeiten – von der Wunschgeschwindigkeit unterscheidet.

Die Gesamtkapazität sinkt auch bei den konventionellen Fahrzeugen mit dem Einmünden einer zweiten Fahrbahn. Bei einer Wunschgeschwindigkeit von 30 km/h erweist sich die geringste Gesamtkapazität bei einem Verhältnis von 800 Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und 600 Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn (siehe Abbildung 35). Es kann also gesagt werden, dass die geringste Gesamtkapazität bei konventionellen Fahrzeugen bei einem Verhältnis von Haupt- zu Nebenstrom bei 1,3:1 auftritt, was deutlich geringer ist als bei autonomen Fahrzeugen, bei denen die geringste Gesamtkapazität bei einem Verhältnis von $q_H:q_N$ bei 3,1:1 gemessen werden kann.

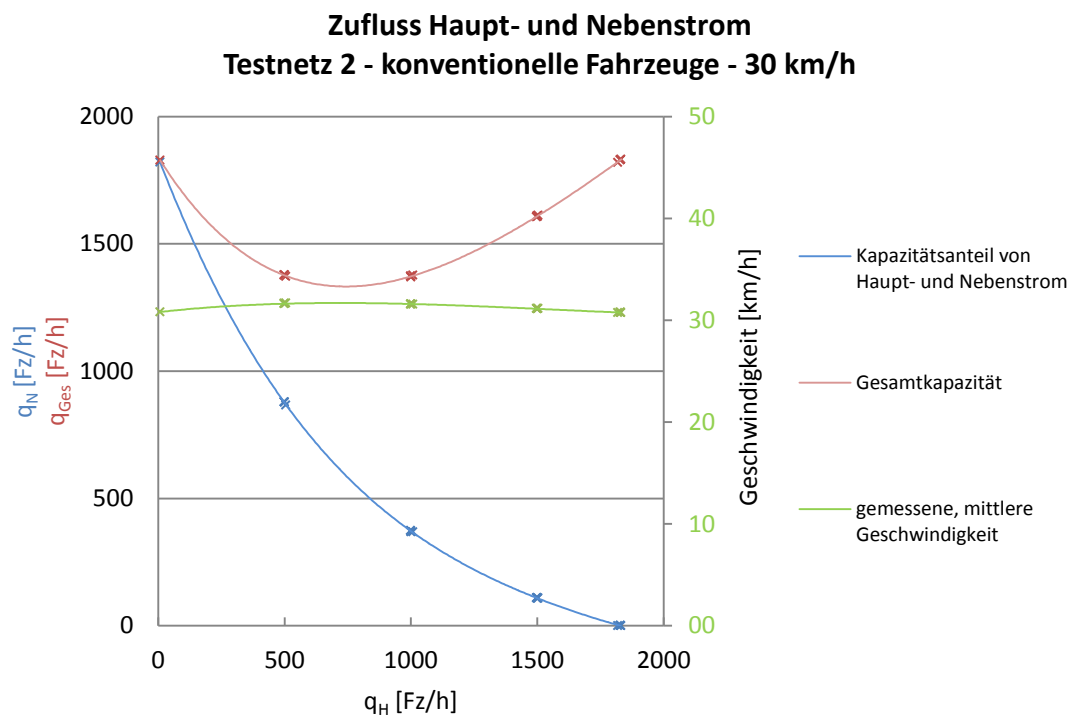


Abbildung 35: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h

Bei konventionellen Fahrzeugen, welchen auf der Haupt- und Nebenfahrbahn eine Wunschgeschwindigkeit von 50 km/h zugeordnet ist, zeigt sich in etwa das gleiche Verhalten wie bei 30 km/h, jedoch ist die Kapazität hier höher ($q_{Ges} = 2300$ Fz/h) als bei 30 km/h (1800 Fz/h). Die geringste Gesamtkapazität ergibt sich hier genau bei einem Verhältnis von $q_H:q_N$ von 1:1. Die Wunschgeschwindigkeit von 50 km/h kann erreicht und gefahren werden.

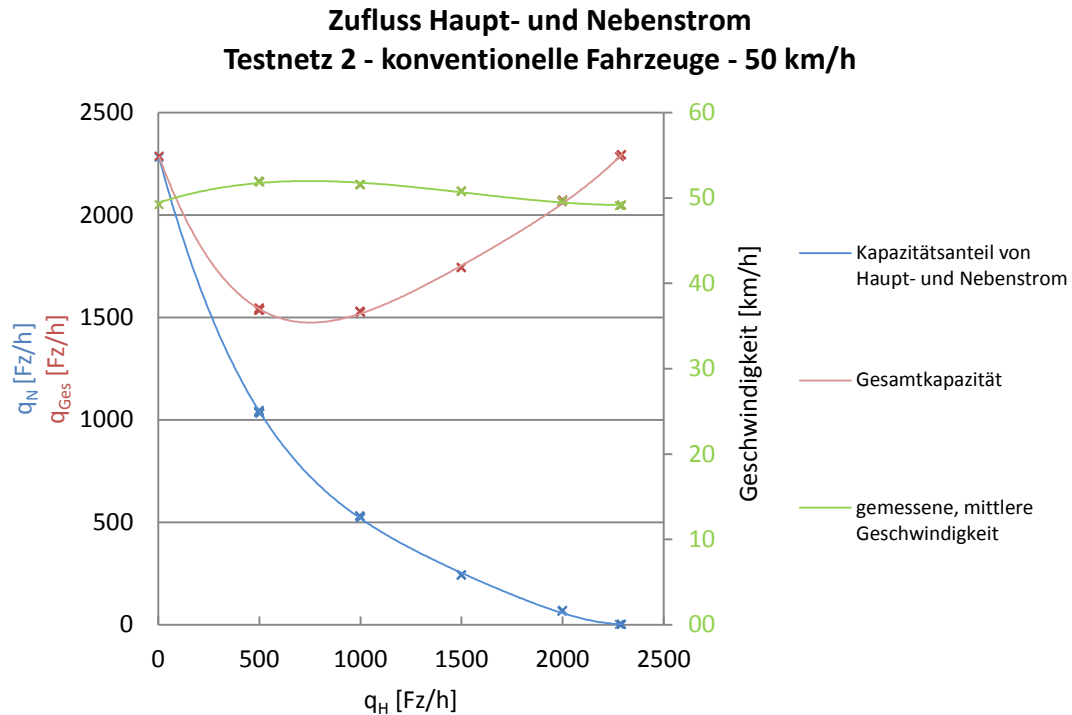


Abbildung 36: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h

Bei einer Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h zeigt sich ein geändertes Bild. Die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit beläuft sich hier auf maximal 70 km/h und je mehr Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn verkehren, desto geringer wird auch die Geschwindigkeit, welche bis auf 60 km/h absinkt. Dadurch beträgt die maximale Gesamtkapazität nur mehr 2100 Fahrzeuge pro Stunde (wenn Zufluss von Haupt- oder Nebenstrom 0 ist). Die minimale Gesamtkapazität zeigt sich auch hier wieder bei einem Verhältnis von $q_H:q_N = 1:1$.

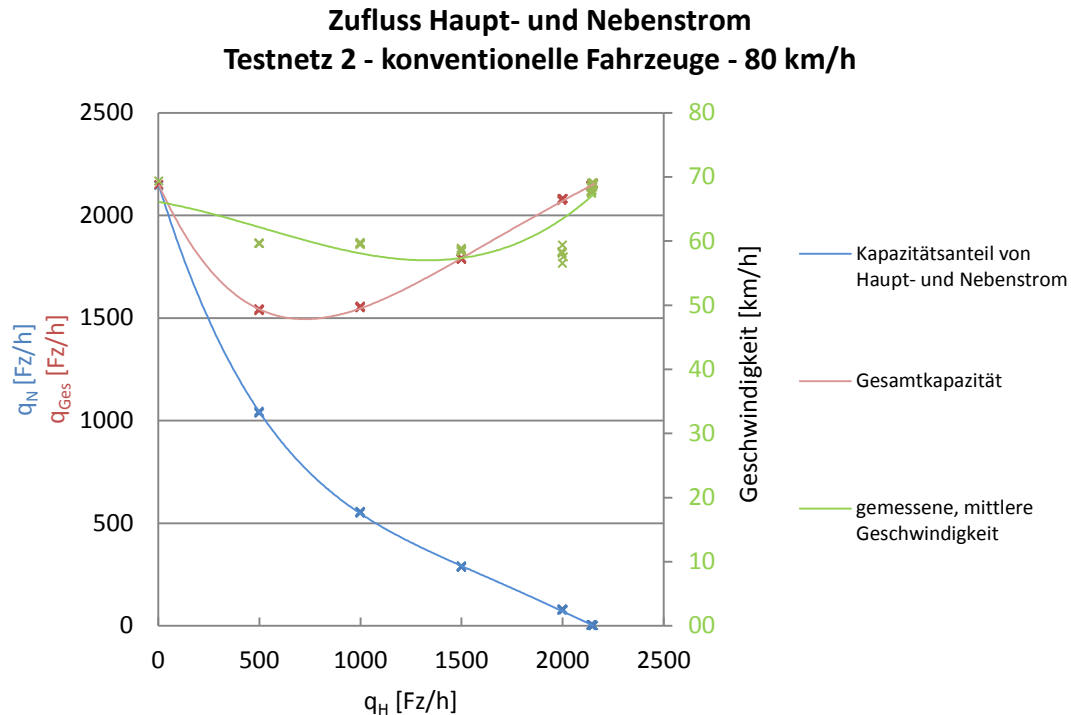


Abbildung 37: Teilnetz 2 – konv – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h

Die RVS besagt, dass sich auf Freilandstraßen mit einer zugelassenen Geschwindigkeit von 80 km/h und einer Einmündung auf diese Strecke, welche mit Vorranggeben gekennzeichnet ist, eine kritische Geschwindigkeit (jene Geschwindigkeit, die beim Erreichen der Leistungsfähigkeit auftritt) von 69 km/h ergibt. [RVS 03.01.11, 2012] Es kann also gesagt werden, dass die Realität und die Simulation annähernd ident sind.

Kapazitätsvergleich unterschiedlicher Fahrzeugtypen

Die drei nachfolgenden Diagramme (Abbildung 38 bis Abbildung 40) zeigen noch einmal zusammenfassend alle Funktionsverläufe der jeweiligen Geschwindigkeiten in jeweils einer Abbildung. Es ist zu erkennen, dass sich die Kapazität konventioneller Fahrzeuge (grün) stark von der Kapazität autonomer Fahrzeuge unterscheidet. Betrachtet man die Kapazität aller autonom fahrenden Fahrzeuge (*aut4* – violett, *aut5* bzw. *pod3* – gelb und *misch* – blau), so lässt sich lediglich eine Verschiebung der Kapazitätsanteilskurven, jedoch ein identer Verlauf erkennen.

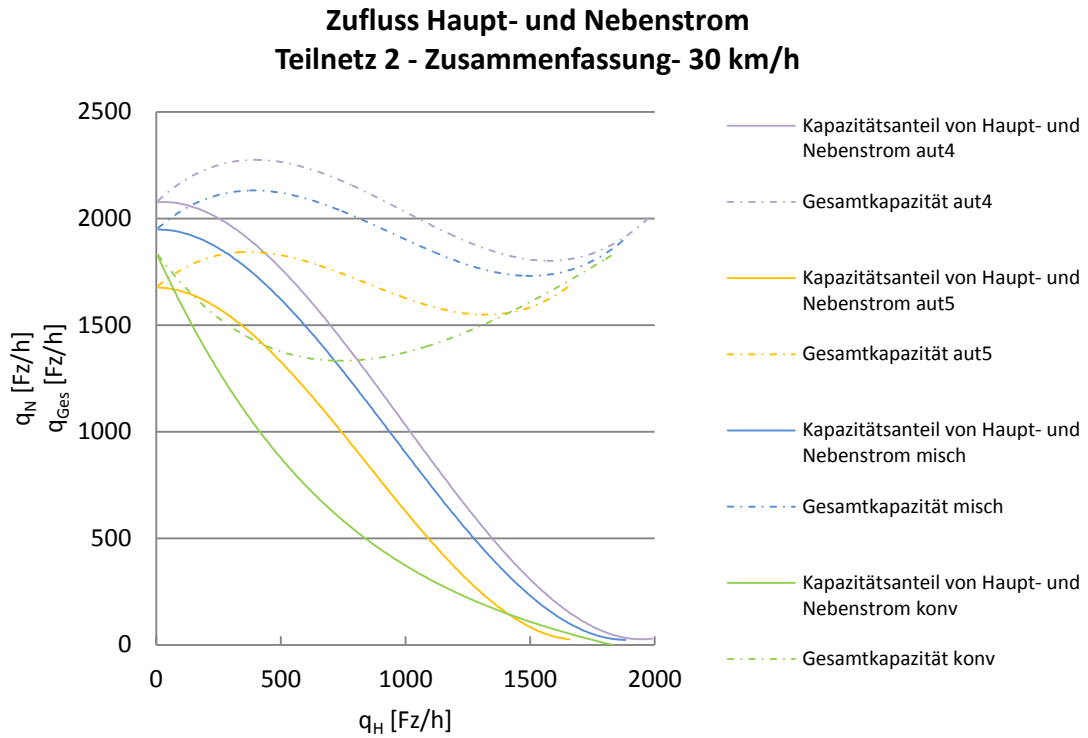


Abbildung 38: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h

Auch bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h erkennt man klar den Unterschied im Verlauf der Kapazitätsanteile zwischen konventionellen und autonomen Fahrzeugen.

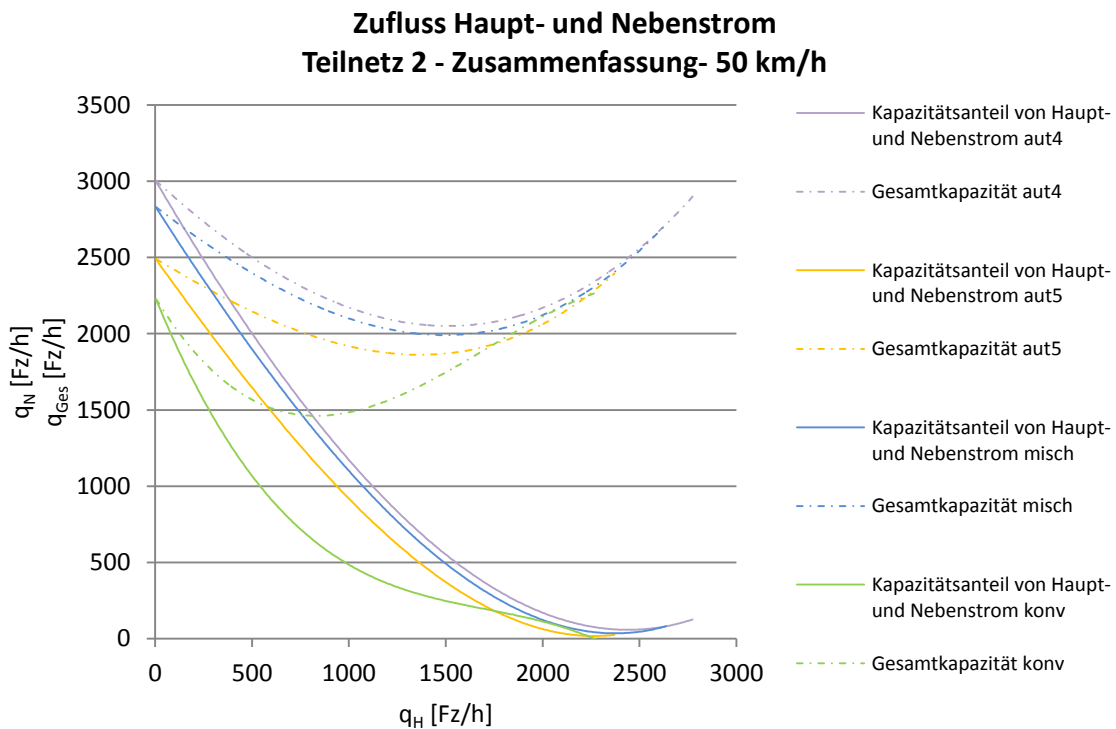


Abbildung 39: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h

Im Wunschgeschwindigkeitsbereich von 80 km/h zeigt sich ein annähernd gleicher Verlauf der Gesamtkapazitäten von autonomen und konventionellen Fahrzeugen, jedoch ist die Anzahl der konventionellen Fahrzeuge deutlich geringer als jene der autonomen Fahrzeuge.

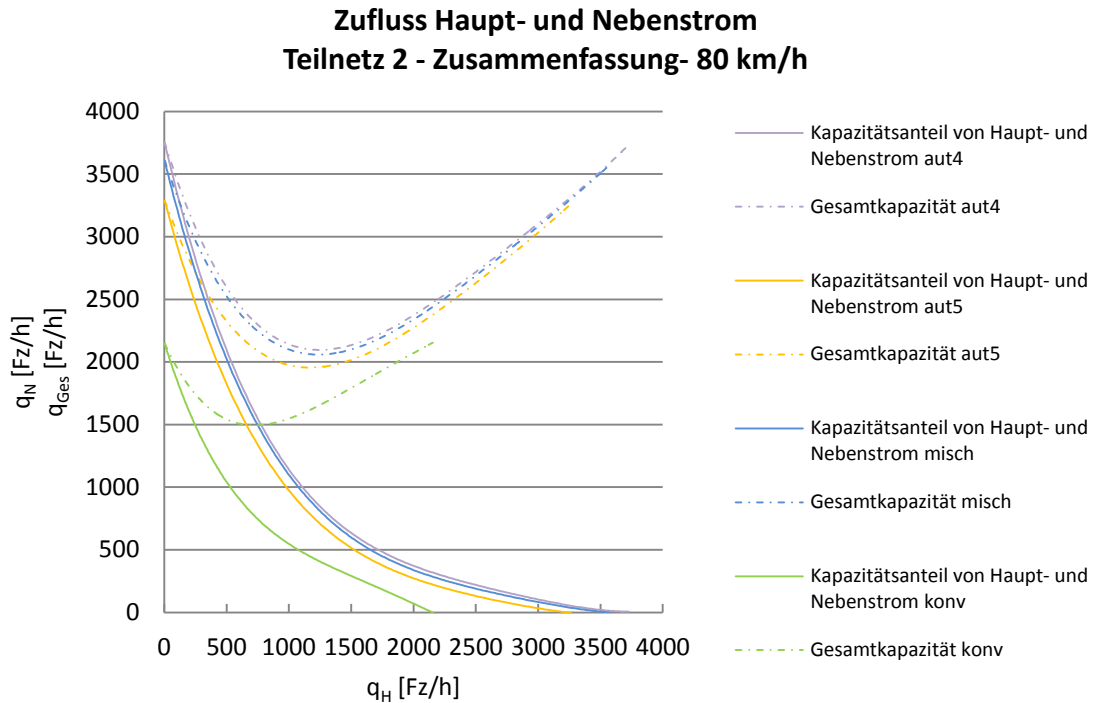


Abbildung 40: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h

Kapazitätsvergleich autonomer sowie konventioneller Fahrzeuge bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Zur Übersicht werden in Abbildung 41 die Funktionsverläufe unterschiedlicher Geschwindigkeiten von autonomen Fahrzeugen in einem Diagramm zusammengefasst. Die verschiedenen Geschwindigkeiten zeigen deutliche Unterschiede in den Funktionsverläufen. Die Gesamtkapazität zeigt bei geringer Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn den höchsten Verkehrsstrom bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h. Dies ist auf die verminderten Sicherheitsabstände beim Einfädeln und die niedrige Geschwindigkeit zurückzuführen. Aufgrund der Nachrangigkeit der Nebenfahrbahn sinkt der Funktionsverlauf der Gesamtkapazität mit zunehmender Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn. Bei Geschwindigkeiten von 50 und 80 km/h zeigt der Gesamtkapazitätsverlauf bei zunehmender Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn zuerst ein Rückgang und anschließend wieder ein Anstieg bis zur Leistungsfähigkeit, welche auch auf freier Strecke ermittelt werden konnte.

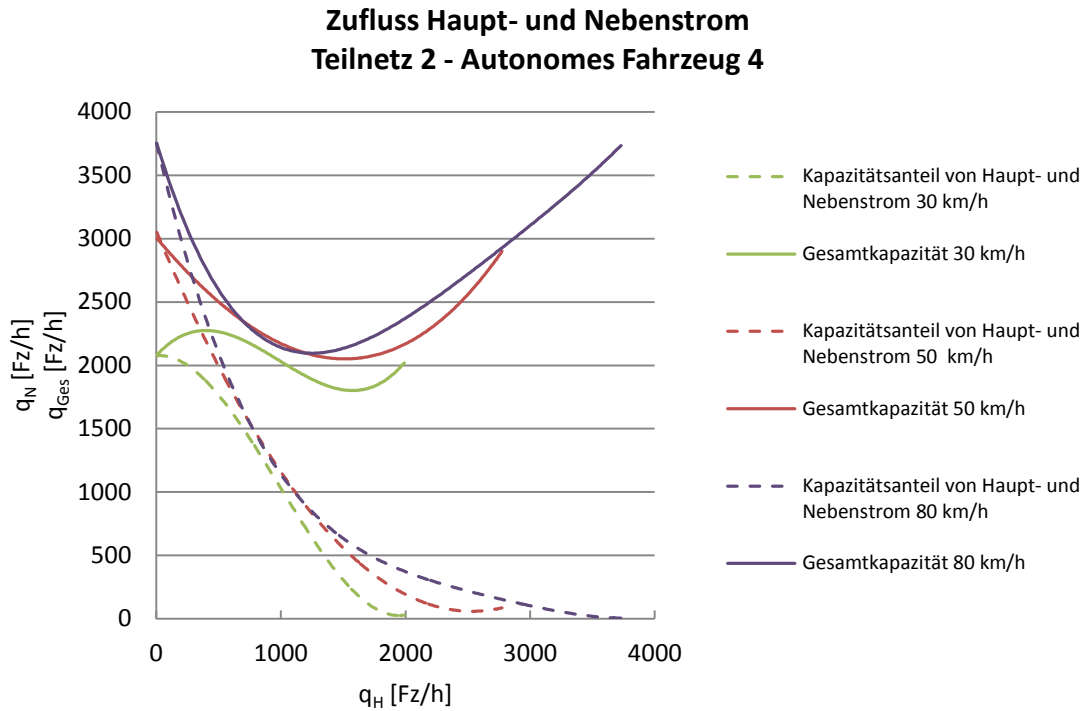


Abbildung 41: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Autonomes Fahrzeug 4

Bei der Zusammenfassung der konventionellen Fahrzeuge mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 42) ist der gleichmäßige Verlauf der Gesamtkapazitäten sowie des Kapazitätenanteils gut zu erkennen. Die Funktionsverläufe unterscheiden sich lediglich in der Höhe der Kapazität.

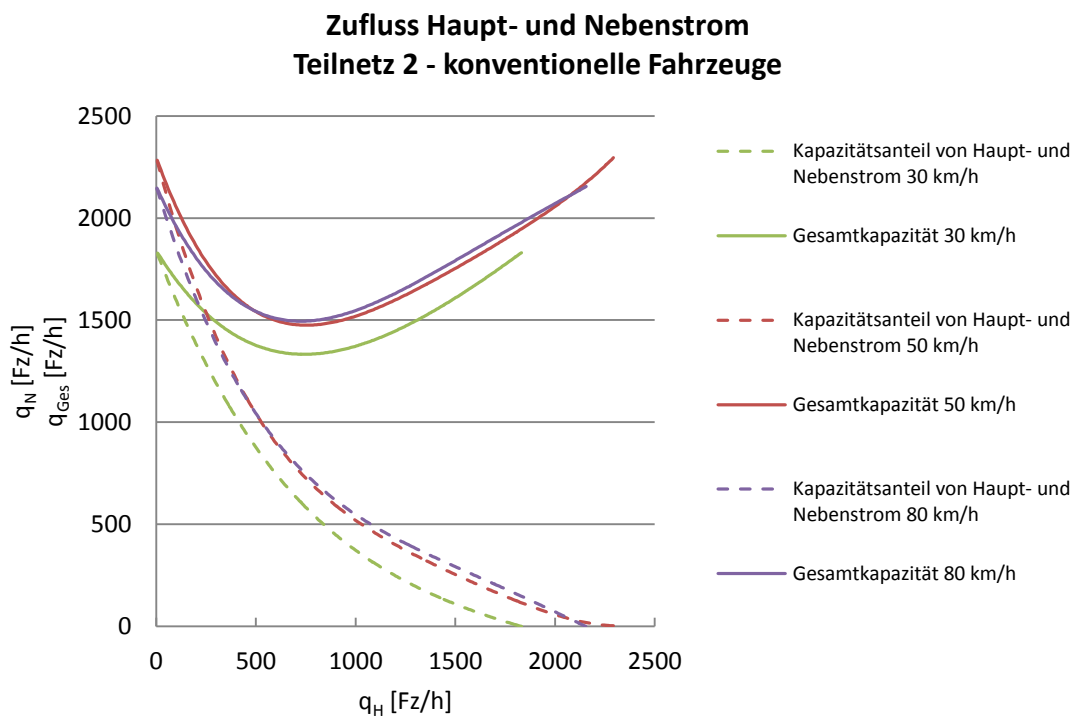


Abbildung 42: Teilnetz 2 – Zusammenfassung – Konventionelles Fahrzeug

Aus all diesen Abbildungen lassen sich Schlüsse auf die Anteile der Verkehrsstärke (Haupt- zu Nebenstrom) und deren Gesamtkapazität bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ziehen, welche im folgenden Kapitel genauer untersucht und analysiert werden.

Eine Aussage über die Kapazitätssteigerung durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge kann durch den Vergleich der Abbildung 38 bis Abbildung 40 entnommen werden. Bei gleichbleibender Hauptverkehrsstärke kann die Gesamtverkehrsstärke verglichen werden (siehe Tabelle 6.11).

Tabelle 6.11: Kapazitätssteigerung bei Strecken mit Einmündung ohne Verflechtungsbereich

	30 km/h			50 km/h			80 km/h		
	aut	konv	Abw	aut	konv	Abw	aut	konv	Abw
q_H	q_{Gesamt}	q_{Gesamt}		q_{Gesamt}	q_{Gesamt}		q_{Gesamt}	q_{Gesamt}	
2000	-	-	-	2274	2072	110%	2403	2080	116%
1500	1877	1612	116%	2078	1743	119%	2180	1786	122%
1000	1930	1373	141%	2106	1526	138%	2176	1548	141%
500	2358	1371	172%	2624	1535	171%	2665	1540	173%

Es zeigt sich, dass eine Kapazitätssteigerung bei Strecken mit Einmündungen ohne Verflechtungsbereich je nach Geschwindigkeit zwischen 71 und 73% möglich ist.

6.4.1 Erweiterte Auswertungen im q-v-Diagramm (Teilnetz 2)

Das Ziel dieser Untersuchung bzw. Darstellung soll eine Aussage über das Verhältnis von der Verkehrsstärke von Haupt- zu Nebenstrom ($q_H:q_N$) in Bezug auf die Gesamtkapazität in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sein.

Auch hier wurden wieder autonome Fahrzeuge Typ 4 und konventionelle Fahrzeuge zur Analyse herangezogen.

Das Teilnetz 2 (Einmündung ohne Verflechtungsbereich) wurde für je eine Simulationsstunde mit einer Verkehrsstärke versehen, welche einem Verhältnis $q_H:q_N$ von 1:1, 2:1, 4:1, 1:2 und 1:4 entspricht. In Tabelle 6.12 und Tabelle 6.13 sind die tatsächlich gemessenen Verkehrsstärken (und deren Verhältnis $q_H:q_N$) der unterschiedlichen Geschwindigkeiten vom autonomen Fahrzeug 4 sowie des konventionellen Fahrzeuges aufgezeigt.

Tabelle 6.12: Verhältnis der Verkehrsstärke – autonomes Fahrzeug Typ 4

$q_H:q_N = 1:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1928	977	951	1.0 : 1
50	2061	1050	1011	1.0 : 1
65	2124	1102	1022	1.1 : 1
80	2116	1076	1040	1.0 : 1
$q_H:q_N = 2:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1845	1248	597	2.1 : 1
50	2037	1383	654	2.1 : 1
65	2123	1452	670	2.2 : 1
80	2150	1462	688	2.1 : 1
$q_H:q_N = 4:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1860	1517	343	4.4 : 1
50	2156	1749	407	4.3 : 1
65	2248	1822	427	4.3 : 1
80	2335	1903	432	4.4 : 1
$q_H:q_N = 1:2$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	2115	721	1394	1 : 1.9
50	2226	772	1454	1 : 1.9
65	2253	788	1466	1 : 1.9
80	2264	768	1495	1 : 1.9
$q_H:q_N = 1:4$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	2348	472	1876	1 : 4.0
50	2534	511	2023	1 : 4.0
65	2579	523	2056	1 : 3.9
80	2565	521	2044	1 : 3.9

Tabelle 6.13: Verhältnis der Verkehrsstärke – konventionelles Fahrzeug

$q_H:q_N = 1:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1318	666	652	1.0 : 1
50	1460	736	724	1.0 : 1
65	1477	746	731	1.0 : 1
80	1475	747	728	1.0 : 1
$q_H:q_N = 2:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1348	916	432	2.1 : 1
50	1513	1020	493	2.1 : 1
65	1551	1050	501	2.1 : 1
80	1541	1040	502	2.1 : 1
$q_H:q_N = 4:1$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1442	1188	254	4.7 : 1
50	1654	1342	312	4.3 : 1
65	1719	1403	316	4.4 : 1
80	1712	1395	318	4.4 : 1
$q_H:q_N = 1:2$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1381	468	913	1 : 1.9
50	1512	513	999	1 : 1.9
65	1520	522	998	1 : 1.9
80	1513	513	1000	1 : 1.9
$q_H:q_N = 1:4$				
v_{Wunsch}	q_{Ges}	q_H	q_N	Verhältnis $q_H:q_N$
30	1482	297	1184	1 : 4.0
50	1640	336	1304	1 : 3.9
65	1651	336	1315	1 : 3.9
80	1643	330	1313	1 : 4.0

Abbildung 43 zeigt, dass ein Verhältnis $q_H:q_N$ von 2:1 bei geringen und 1:1 bei höheren Geschwindigkeiten bei autonomen Fahrzeugen zu den geringsten Gesamtkapazitäten führt. Die besten Ergebnisse (höchste Gesamtkapazitäten) lassen sich bei autonomen Fahrzeugen bei einem hohen Zufluss auf der Nebenfahrbahn verzeichnen (Verhältnis 1:4). Außerdem ist ersichtlich, dass ab einer Geschwindigkeit von etwa 42 km/h die Gesamtkapazität am höchsten ist, wenn es sich um eine freie Strecke ohne Zufluss handelt (siehe Schnittpunkt der orangen und blauen Linie). Dies ist wie schon vorher beschrieben auf die verringerten Sicherheitsabstände beim Einfädeln zurückzuführen.

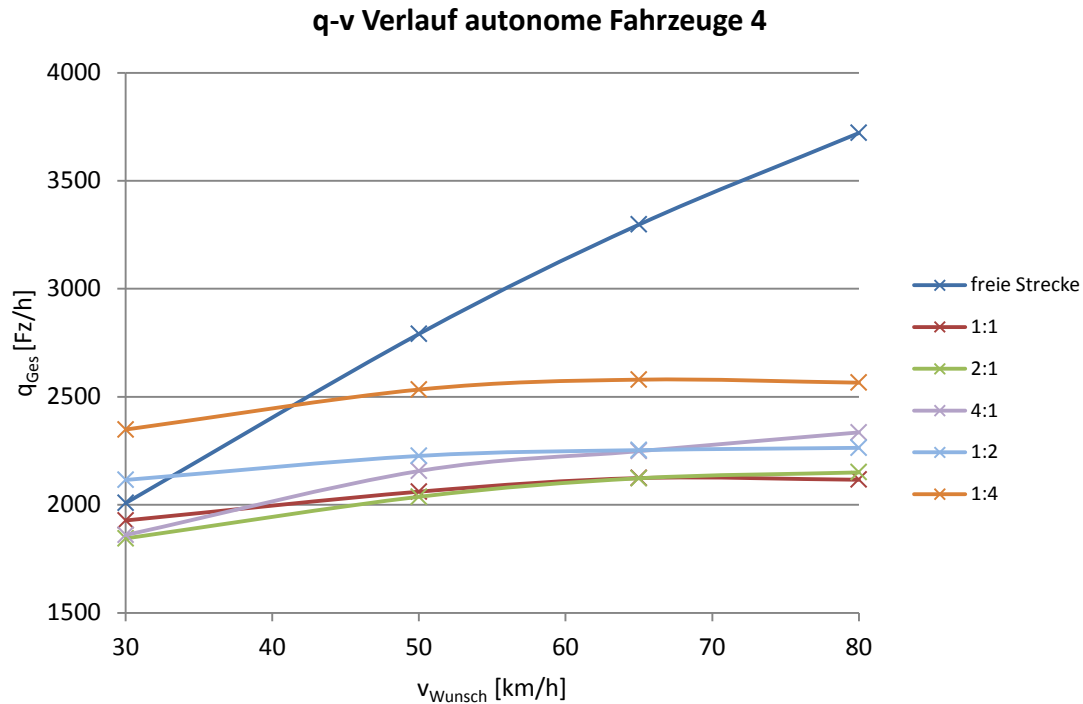


Abbildung 43: q-v Verlauf für autonome Fahrzeuge 4 (Teilnetz 2)

Die größte Kapazität ergibt sich bei konventionellen Fahrzeugen immer auf freier Strecke (blaue Linie in Abbildung 44). Das Maximum zeigt sich hier bei einer Geschwindigkeit von etwa 55 km/h. Außerdem ist die Kapazität bei konventionellen Fahrzeugen immer am geringsten bei einem Verhältnis Haupt- zu Nebenzufluss von 1:1. Bei niedrigen Geschwindigkeiten kann die maximale Leistungsfähigkeit bei einer hohen Verkehrsstärke auf der Nebenfahrbahn und wenig Verkehr auf der Hauptfahrbahn (Verhältnis 1:4) erreicht werden. Ab einer Geschwindigkeit von etwa 48 km/h ändert sich dieser Umstand und es ist für die Leistungsfähigkeit der Strecke von Vorteil, wenn auf der Hauptfahrbahn deutlich mehr Fahrzeuge verkehren als auf der Nebenfahrbahn (Verhältnis 4:1), im Unterschied zu den autonomen Fahrzeugen. Dies ist auf das menschliche Fahrverhalten zurückzuführen, denn Fahrzeuglenker müssen eine geeignete Lücke zum Einfahren auf die Hauptfahrbahn abwarten und diese richtig einschätzen. Anders ist dies bei autonomen Fahrzeugen, da sie automatisch gesteuert werden und sich gegenseitig erkennen und so jede mögliche Lücke ausnutzen können.

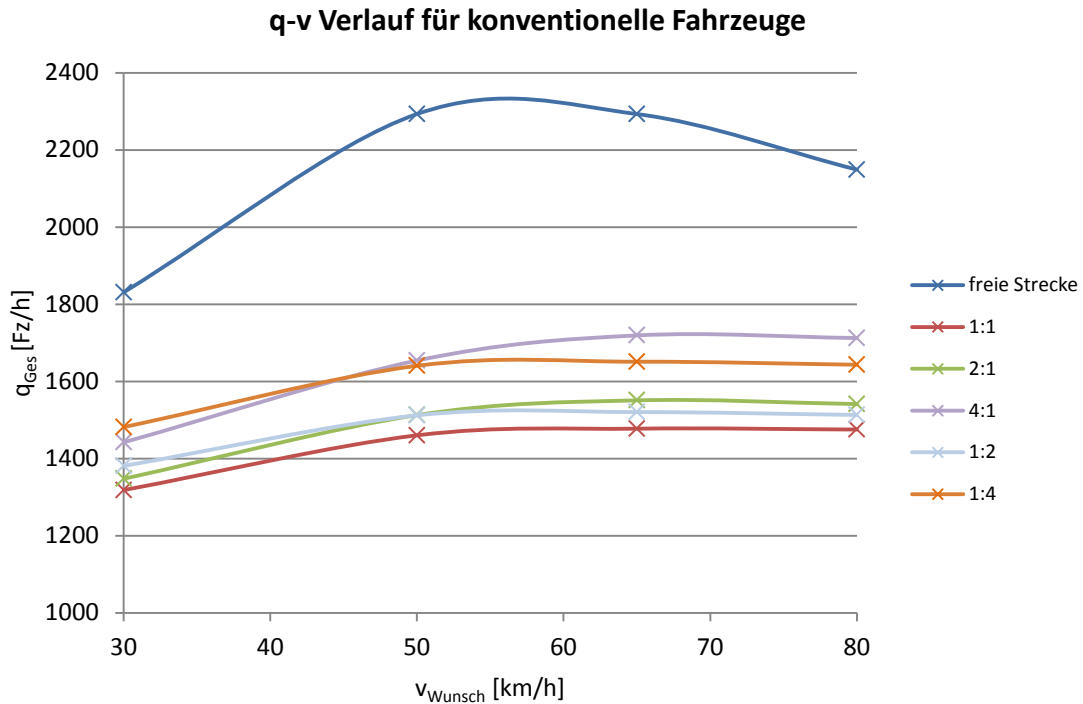


Abbildung 44: q-v Verlauf für konventionelle Fahrzeuge (Teilnetz 2)

6.5 Kapazität bei Einmündungen mit Verflechtungsbereich

Das dritte Teilnetz, welches eine Einmündung mit Verflechtungsbereich und Beschleunigungsstrecke darstellt, soll als Knotendetail für das später zu analysierende Gesamtnetz gesehen werden. Die Geometrie der Nebenfahrbahn ist hierfür genau definiert. Es handelt sich um eine Kurve mit einem Radius von 30 Metern, welche aus fahrdynamischen Bedingungen nur eine maximale Geschwindigkeit von 31 km/h zulässt, sowie um eine Beschleunigungsstrecke und einen Verflechtungsbereich (siehe Abbildung 45).

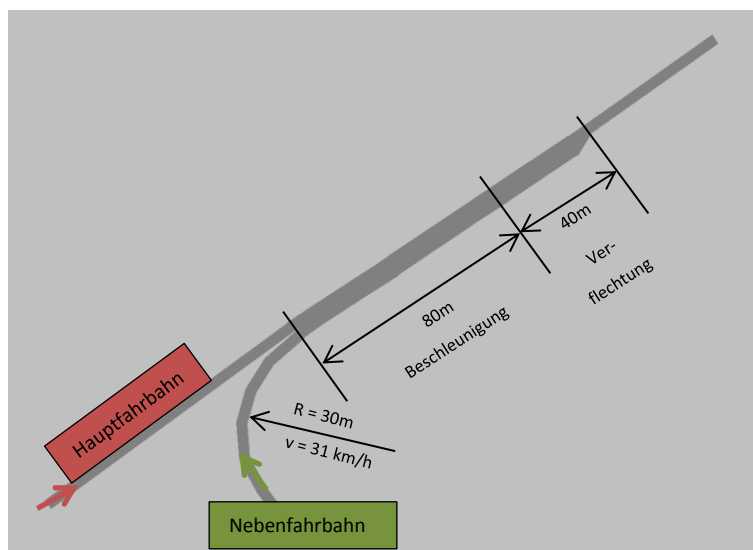


Abbildung 45: Schematische Darstellung Einmündung mit Verflechtung (Teilnetz 3)

Die Gesamtlänge der Kurve beträgt etwa 60 Meter, der Beschleunigungsbereich hat eine Länge von 80 Metern und der Verflechtungsbereich ist 40 Meter lang. Fünf Meter vor Ende der Kurve haben die Fahrzeuge die Möglichkeit mit dem Beschleunigen zu beginnen. Mit der vorgegebenen Geschwindigkeit im Kreisbogen ist die Geschwindigkeit auf der Nebenfahrbahn als gegeben anzusehen und es kann nur die Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn gewählt werden, welche entweder 30, 50 oder 80 km/h beträgt. Die genauere Beschreibung der Geometrien der Strecken und Verbindungen auf dem Gesamtnetz sind dem Kapitel 7.2.2 zu entnehmen.

Auch für die Simulationen und Auswertungen am dritten Teilnetz wurden, wie Tabelle 6.14 zeigt, zu jeder Simulationsstunde unterschiedliche Verkehrsstärken auf Haupt- und Nebenfahrbahn gewählt.

Tabelle 6.14: Anzahl der Fahrzeuge je Simulationsstunde und Geschwindigkeit für $q_H:q_N$ -Diagramme

Von Sekunde	Bis Sekunde	$v_H = 30$ km/h		$v_H = 50$ km/h		$v_H = 80$ km/h	
		q_H [Fz/h]	q_N [Fz/h]	q_H [Fz/h]	q_N [Fz/h]	q_H [Fz/h]	q_N [Fz/h]
300	3900	2050	0	2800	0	3800	0
3900	7500	1800	400	2500	330	3500	10
7500	11100	1650	540	2000	515	3000	15
11100	14700	1500	680	1500	810	2500	95
14700	18300	1000	1170	1200	1040	2000	175
18300	21900	500	1740	1000	1220	1500	520
21900	25500	200	1780	500	1850	1000	915
25500	29100	0	2050	200	2360	500	1500
29100	32700			0	2800	200	2000
32700	36300					0	2850

Bei einer Hauptfahrbahngeschwindigkeit von 30 km/h zeigt sich ein deutlich anderes Bild als es bisher der Fall war. In Abbildung 46 ist eine konvexe Polynomkurve der Gesamtkapazität sowie des Kapazitätsanteils von Haupt- und Nebenstrom zu erkennen. Dies bedeutet, dass die maximale Kapazität nur dann erreicht werden kann, wenn ein Zufluss von Haupt- und Nebenfahrbahn vorherrscht. In diesem Fall tritt die maximale Kapazität bei einem $q_H:q_N$ Verhältnis von 1,6:1 auf (1400:850; $q_{Ges} = 2250$ Fz/h), welches etwa 112% der Kapazität auf freier Strecke entspricht. Daraus kann geschlossen werden, dass der Verflechtungsbereich für einen optimalen Verflechtungsvorgang ausreicht. Dieser Anstieg der Kapazität ist auf die verminderten Sicherheitsabstände während des Verflechtungsvorganges zurückzuführen.

**Zufluss Haupt- und Nebenstrom
Testnetz 3 - Autonomes Fahrzeug 4
 $q_H = 30 \text{ km/h}$**

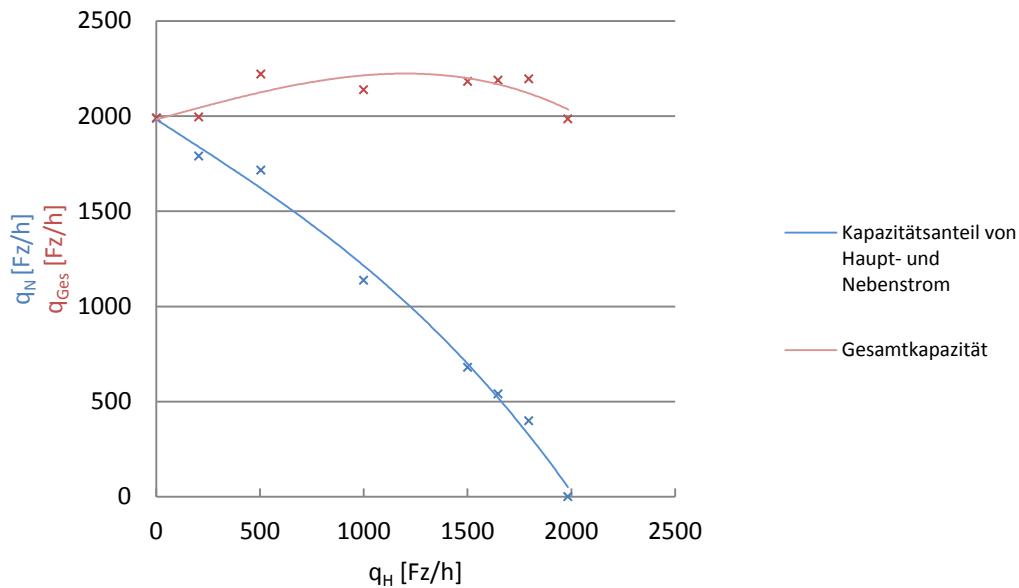


Abbildung 46: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 30 \text{ km/h}$

Abbildung 47 zeigt das Ergebnis des maximal abwickelbaren Verkehrsflusses auf einer Strecke mit Einmündung und Verflechtungsbereich bei einer Hauptfahrbahngeschwindigkeit von 50 km/h. Sind auf der Hauptfahrbahn 50 km/h zugelassen, fällt auf, dass die geringste Gesamtkapazität bei rund 2200 Fahrzeugen liegt, im Gegensatz zur Einmündung ohne Verflechtung, bei der mit der gleichen Geschwindigkeit die geringste Gesamtkapazität bei etwa 2000 Fahrzeugen pro Stunde liegt. Dies lässt darauf schließen, dass es bei Einmündungen mit einem Verflechtungsbereich im Vergleich zu einer Einmündung ohne Verflechtungsbereich zu einer Erhöhung der Gesamtkapazität kommt.

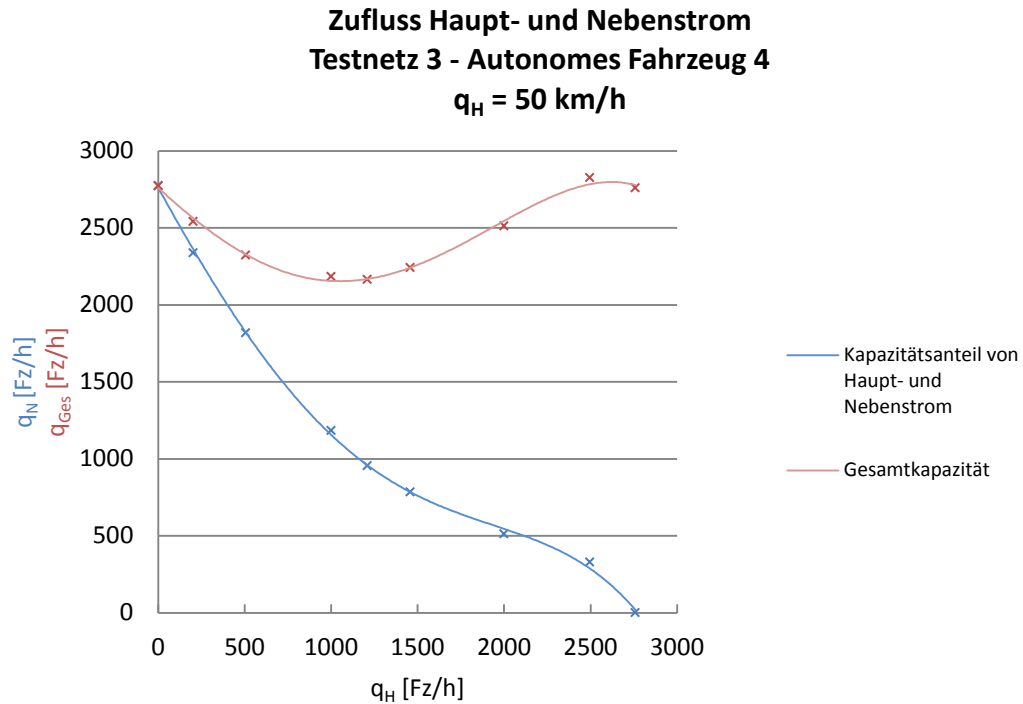


Abbildung 47: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 50 \text{ km/h}$

Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit der Hauptfahrbahn auf 80 km/h lässt sich eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeit am Messquerschnitt feststellen, besonders bei einem hohen Zufluss des Nebenstromes. Dies deutet darauf hin, dass die Fahrzeuge von der Nebenfahrbahn die gewünschte Geschwindigkeit mithilfe der Beschleunigungsstrecke nicht erreichen können. Somit ergibt sich eine minimale Kapazität bei einem Verhältnis von $q_H:q_N = 2:1$ ($1300:650$; $q_{Ges} = 1950 \text{ Fz/h}$).

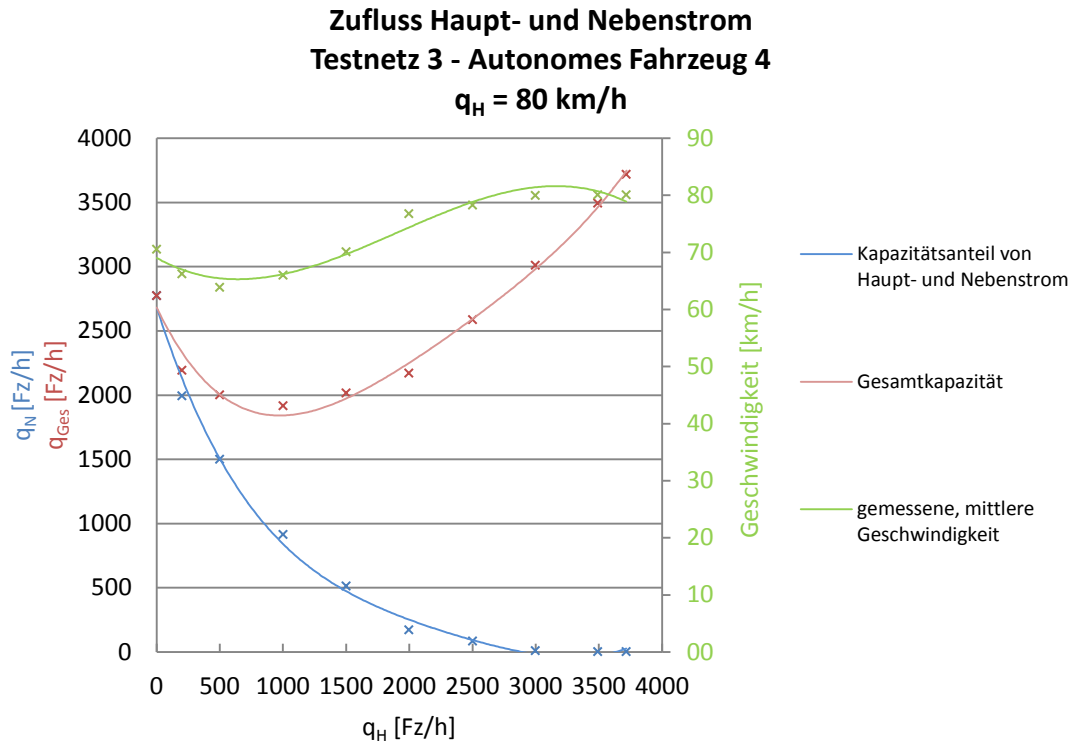


Abbildung 48: Teilnetz 3 – aut4 – Geschwindigkeit $q_H = 80 \text{ km/h}$

Bei den Beobachtungen des Verkehrsflusses zeigt sich, dass bei 30 km/h auf der Hauptfahrbahn ein optimaler Einfädelungsprozess vorherrscht, da die Geschwindigkeiten der beiden Fahrbahnen gleich groß sind.

Um jedoch eine Geschwindigkeit von 80 km/h erreichen zu können, müsste der Beschleunigungstreifen 105 Meter lang sein (ergibt sich aus $x=(v_1^2-v_0^2)/2a$), weshalb die Fahrzeuge der Hauptfahrbahn beim Einfädelungsprozess etwas verlangsamt werden und so den Verkehrsfluss verschlechtern.

6.5.1 Erweiterte Auswertungen im q - v -Diagramm (Teilnetz 3)

Die nun nachfolgenden Diagramme sollen wie schon beim Netz der Einmündung ohne Verflechtungsbereich (Teilnetz 2 – siehe Kapitel 6.4.1) eine Aussage über das Verhältnis der Verkehrsstärke von Haupt- zu Nebenstrom ($q_H:q_N$) in Bezug auf die Gesamtkapazität in Abhängigkeit der Geschwindigkeit geben. Zur Untersuchung werden autonome Fahrzeuge Typ 4 herangezogen.

Das Teilnetz 3 (Einmündung mit Verflechtungsbereich) wurde für je eine Simulationsstunde mit einer Verkehrsstärke versehen, welche einem Verhältnis $q_H:q_N$ von 1:1, 2:1, 4:1, 1:2 und 1:4 entspricht. In Tabelle 6.15 sind die tatsächlich gemessenen Verkehrsstärken (und deren Verhältnis $q_H:q_N$) der unterschiedlichen Geschwindigkeiten vom autonomen Fahrzeug Typ 4 aufgezeigt.

Tabelle 6.15: Verhältnis der Verkehrsstärke je Simulationsstunde und Geschwindigkeit (aut4)

q _H :q _N = 1:1						
v _{Wunsch}	q _{Ges}	q _H	q _N	Verhältnis		
				q _H :q _N		
30	2098	1047	1051	1	:	1
50	2157	1078	1078	1	:	1
80	2003	1005	998	1	:	1
q _H :q _N = 2:1						
v _{Wunsch}	q _{Ges}	q _H	q _N	Verhältnis		
				q _H :q _N		
30	2154	1441	713	2.0	:	1
50	2209	1468	741	2.0	:	1
80	2064	1379	685	2.0	:	1
q _H :q _N = 4:1						
v _{Wunsch}	q _{Ges}	q _H	q _N	Verhältnis		
				q _H :q _N		
30	2246	1797	449	4.0	:	1
50	2547	2037	510	4.0	:	1
80	2183	1747	436	4.0	:	1
q _H :q _N = 1:2						
v _{Wunsch}	q _{Ges}	q _H	q _N	Verhältnis		
				q _H :q _N		
30	2155	730	1426	1	:	2.0
50	2276	774	1502	1	:	1.9
80	2215	742	1473	1	:	2.0
q _H :q _N = 1:4						
v _{Wunsch}	q _{Ges}	q _H	q _N	Verhältnis		
				q _H :q _N		
30	2212	447	1765	1	:	3.9
50	2331	478	1852	1	:	3.9
80	2264	451	1813	1	:	4.0

Die Auswertung der unterschiedlichen Verhältnisse von q_H zu q_N in Abhängigkeit der gewünschten Geschwindigkeit bei einer Einmündung mit Verflechtungsbereich ist in Abbildung 49 im Vergleich zur freien Strecke zu sehen. Es zeigt sich, wie schon beim Teilnetz 2, dass die Gesamtkapazität bei einer Zusammensetzung von 1:1 bzw. 2:1 am geringsten ist. Die hier im Vergleich veränderten Werte zeigen sich bei Verhältnissen von 1:4 und 4:1, wobei beim Teilnetz 3 die maximale Kapazität bei einem Verhältnis von q_H:q_N bei 4:1, vor allem in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen, erreicht werden kann.

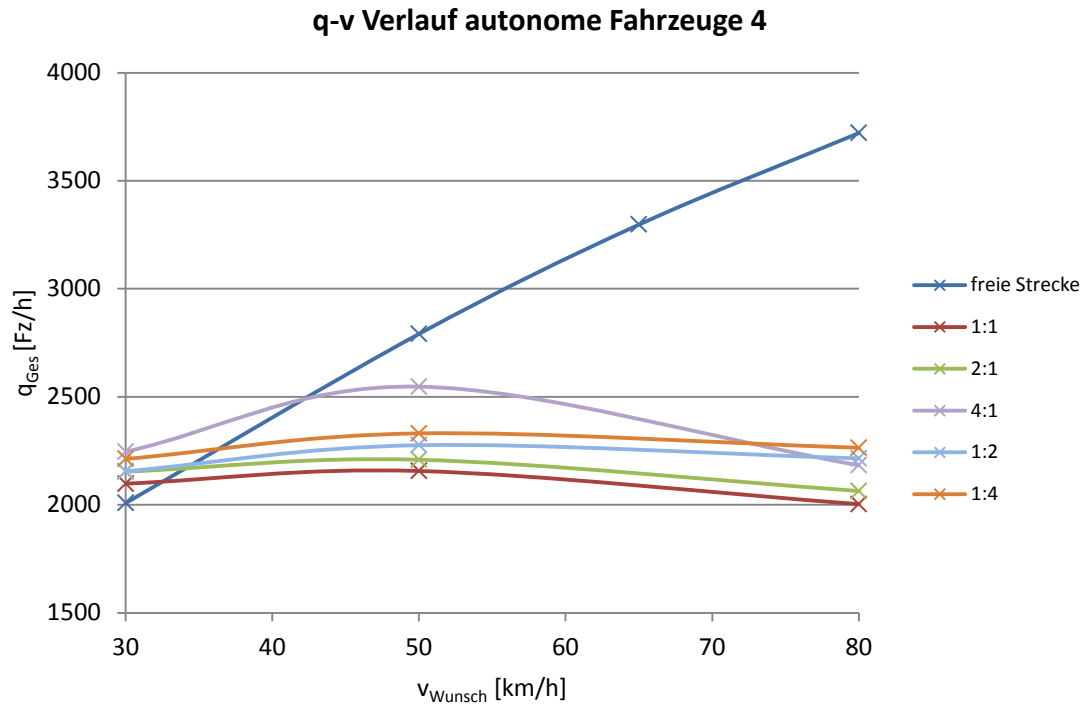


Abbildung 49: q-v Verlauf für autonome Fahrzeuge 4 (Teilnetz 3)

6.6 Vergleich der Einmündungen mit und ohne Verflechtungsbereich

Abschließend werden nun Einmündungsbereiche und deren Kapazitäten mit (Teilnetz 3) und ohne (Teilnetz 2) Verflechtungsbereich verglichen. In Abbildung 50 stellen die durchgehenden Linien die Gesamtkapazität und die gestrichelten Linien den Kapazitätsanteil von Haupt- und Nebenstrom dar, wobei zwischen Einmündung mit Verflechtungsbereich (lila) und Einmündung ohne Verflechtungsbereich (orange) unterschieden wird. Es zeigt sich, dass die Gesamtkapazität bei einer Verkehrsstärke von unter 1000 Fz/h auf dem Hauptstrom bei Einmündungen mit Verflechtungsbereich geringer ist. Bei einer Verkehrsstärke von über 1000 Fz/h auf der Hauptfahrbahn ist eine höhere Gesamtkapazität bei Einmündungen mit Verflechtungsbereich nachzuweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei großen Verkehrsmengen auf der Hauptfahrbahn das Einfädeln der Fahrzeuge der Nebenfahrbahn auf die Hauptfahrbahn durch das Vorhandensein eines Einfädelungsbereiches deutlich begünstigt wird.

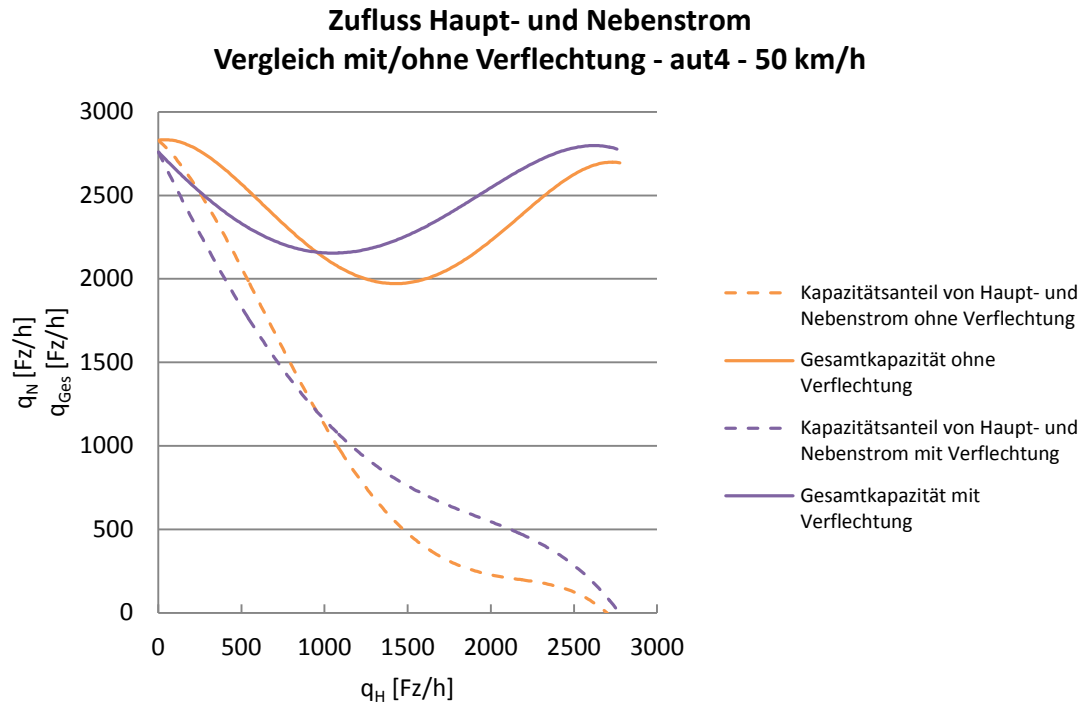


Abbildung 50: Vergleich der Kapazität mit und ohne Verflechtungsbereich

Tabelle 6.16 zeigt die Abweichungen von Einmündungen mit und ohne Verflechtungsbereich dargestellt in Zahlen. Es stellt sich heraus, dass durch einen Verflechtungsbereich bei der Einmündung eine Kapazitätssteigerung von maximal 11% möglich ist und bei niedrigen Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn eine Einmündung ohne Verflechtungsbereich sogar günstiger erscheint.

Tabelle 6.16: Vergleich der Kapazität mit und ohne Verflechtungsbereich

q_H	ohne Verflechtung	mit Verflechtung	Abweichung
	q_{Gesamt}	q_{Gesamt}	
[Fz/h]	[Fz/h]	[Fz/h]	[%]
2500	2582	2825	109%
2000	2273	2512	111%
1500	2078	2241	108%
1000	2111	2184	103%
500	2629	2322	88%

7 Leistungsfähigkeitsanalyse am Gesamtnetz

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau eines Gesamtnetzes (für autonome Fahrzeuge) auf Basis von OSM-Daten beschrieben, in welchem in weiterer Folge die Ergebnisse der Teilnetze aus Kapitel 6 implementiert werden. Anschließend folgt die Leistungsfähigkeitsanalyse des Gesamtnetzes sowie einzelner, betrachteter Knotenpunkte. Die Grundstruktur des Gesamtnetzes wurde in Zusammenarbeit der Projektgruppen AVESTRA und QUICKWAY entwickelt und im nächsten Kapitel 7.1 beschrieben.

7.1 Grundstruktur des Gesamtnetzes

Durch die in der Einleitung bereits beschriebene Problematik bezüglich der Verkehrssituation im städtischen Raum, wurde ein Konstrukt entwickelt, welches autonomes Fahren vom konventionellen Verkehr trennt. Grundlegend handelt es sich dabei um separate, höher gelegene Fahrwege aus ultrahochfestem Beton.

Im Gesamtnetz existieren drei unterschiedliche Streckentypen (primär, sekundär und tertiär), auf welchen unterschiedliche Fahrzeugklassen sowie Geschwindigkeiten zugelassen sind. Außerdem befindet sich jeder Streckentyp auf einer eigenen Ebene. So liegt das tertiäre Netz auf Level 0 (Bodenniveau) das sekundäre und primäre Netz werden auf eine Höhe von 5,5 Metern (Level 1) gebracht. Die Beschreibung zu den einzelnen Strecken findet sich nachfolgend in Kapitel 7.2.1. Aufgrund der städtebaulichen Bedingungen und der Umsetzungsmöglichkeit eines solchen Systems ist eine Megacity notwendig. Für das Projekt QUICKAY sowie für die vorliegende Masterarbeit und das Projekt AVESTRA wurde der Stadtstaat Singapur ausgewählt.

Auf einer Fläche von 714 km², welche etwa jener von Hamburg entspricht und 63 Inseln beinhaltet, leben 5,3 Mio. Einwohner (Stand Juni 2012). Dies entspricht einer Einwohnerdichte von 7400 Personen pro Quadratkilometer. Durchschnittlich besitzt circa jeder 9. Bewohner von Singapur ein eigenes Auto. [Singapore, 2015]

Für diese Arbeit wurde ein Ausschnitt aus Singapur gewählt, an welchen das Modellnetz angelehnt werden soll (siehe Abbildung 51).

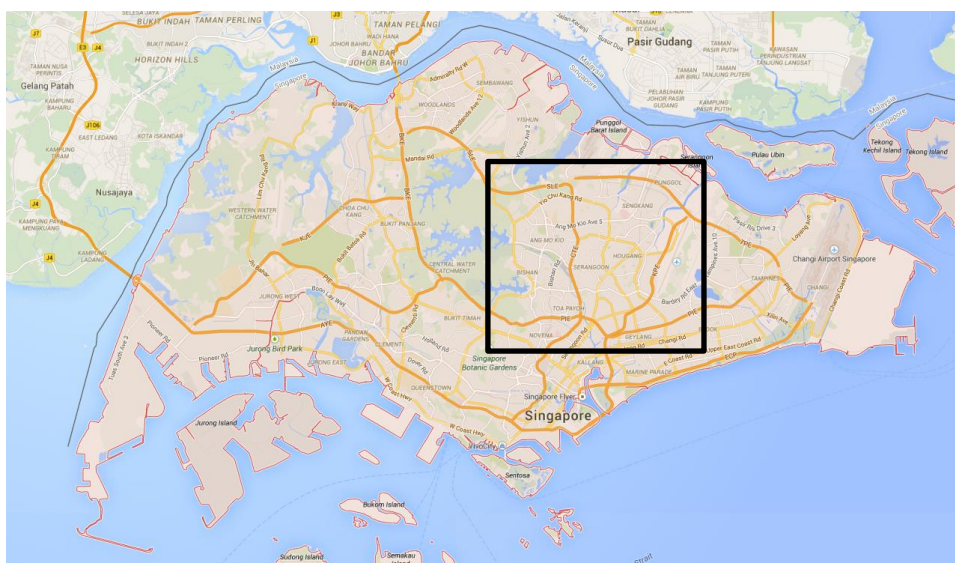


Abbildung 51: Singapur mit Eingrenzung des bearbeiteten Netzausschnittes [Google Maps, 2015]

7.2 Aufbau eines makroskopischen Netzes

Der Aufbau des Netzes basiert auf OSM-Daten von Singapur, welche der Geofabrik entnommen wurden (2014). Diese wurden anschließend in VISUM 14.00 der PTV AG (folgend als VISUM bezeichnet) als makroskopisches Verkehrsmodell importiert und weiter bearbeitet. Zu diesen Bearbeitungsschritten zählen die Zuordnung der Strecken zu unterschiedlichen Typen, die Erstellung von Bezirken, Anbindungen, Haltestellen und Nachfrage, sowie der Definition von ÖV-Linien und deren Routen, welche im Folgenden beschrieben werden.

7.2.1 Streckentypen

Im betrachteten Netz von Singapur soll es nun drei verschiedene Streckentypen geben, auf denen unterschiedliche Geschwindigkeiten und Fahrzeugtypen zugelassen sind. Es handelt sich hierbei um primäre, sekundäre und tertiäre Strecken.

Kapazität der Strecken

Wie in Kapitel 6.5.1 erläutert, wurden für die Strecke mit Einmündung und Verflechtungsbereich (Teilnetz 3) unterschiedliche Verhältnisse des Zuflusses von Haupt- und Nebenstrom betrachtet. Die Kapazitäten der unterschiedlichen Geschwindigkeiten bzw. Streckentypen, welche nun im Gesamtnetz übernommen werden, entsprechen jenen, wie Tabelle 7.1 zeigt, welche bei einem Verhältnis von Haupt- zu Nebenstrom von 2:1 auftreten.

Tabelle 7.1: Kapazitäten bei $q_H:q_N = 2:1$

v_{Wunsch} [km/h]	q_{Ges} [Fz/h]	q_H [Fz/h]	q_N [Fz/h]
80	2064	1379	685
50	2209	1468	741
30	2154	1441	713

Aus dieser Tabelle können die Kapazitäten (hier q_{Ges}) für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten entnommen werden.

Beschreibung Streckentypen

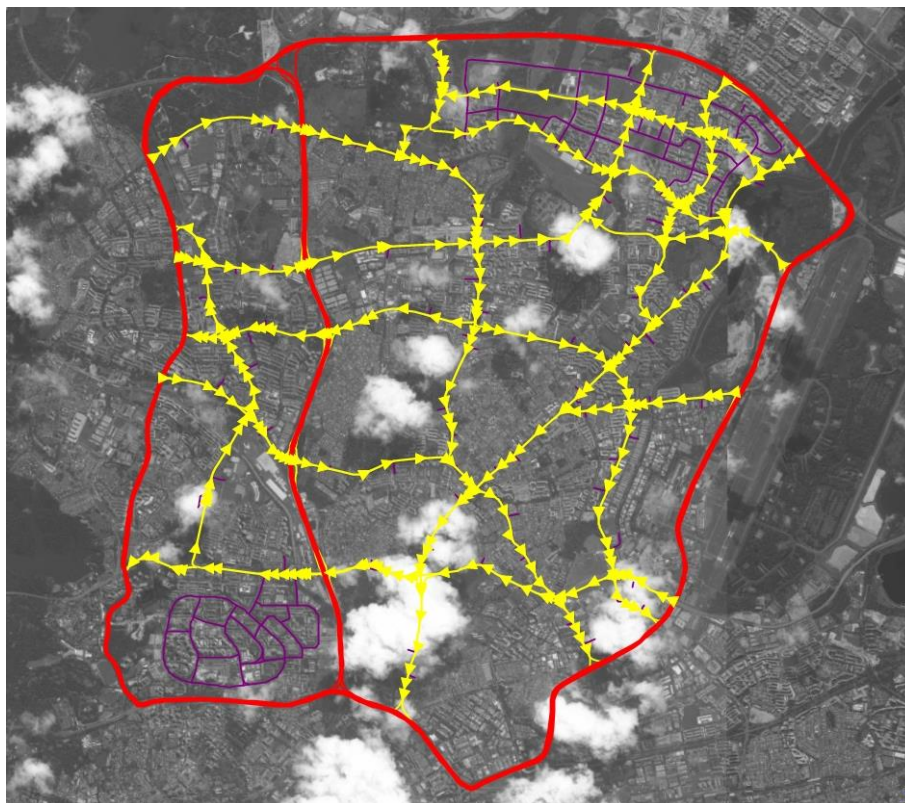
Wie in Tabelle 7.2 zu sehen, sind auf den primären und sekundären Strecken autonome Fahrzeuge und Podcars zugelassen. Konventionelle und autonome Fahrzeuge dürfen auf dem tertiären Netz verkehren. Zwei Fahrtrichtungen besitzt das primäre Netz, jedoch sind die Fahrbahnen baulich voneinander getrennt und es gibt pro Fahrtrichtung nur einen Fahrstreifen. Das sekundäre Netz wird als Einbahnsystem ausgebildet, kann also nur in jeweils eine Richtung befahren werden. Das tertiäre Netz wird ein- bzw. zweistreifig ausgeführt und ist in beide Richtungen befahrbar. Die Strecken sollen mit 30, 50 oder 80 km/h befahren werden können.

Tabelle 7.2: Streckentypen im Gesamtnetz

Strecken- typ	Geschwin- digkeit [km/h]	Fahrzeug- typen	Kapazität [Fz/h]	Anzahl Fahrtrich- tungen	Anzahl Fahrstreifen pro Fahrtrichtung	Darstellung in VISUM
Primär	80	aut, pod	2064	2	1	rot
Sekundär	50	aut, pod	2209	1	1	gelb
Tertiär	30	aut, konv	2154	2	1-2	violett

Alle in Abbildung 51 orange gekennzeichneten Strecken (im Ausschnitt), welche dem hochrangigen Netz entsprechen, werden im makroskopischen Verkehrsmodell als primärer Streckentyp bezeichnet. Auch die im rechten Teil des Bildes ersichtliche gelbe Strecke, welche von Norden nach Süden verläuft, wird, um ein abgeschlossenes Netz zu erzeugen, als primäre Strecke gehandhabt. Die gelben Strecken stellen den zweithöchsten Rang im Netz dar und werden als sekundärer Streckentyp bezeichnet. Um ein durchgängiges Netz zu erzeugen, werden auch vereinzelt Strecken, welche einen niedrigeren Rang besitzen, dem sekundären Netz zugeordnet.

In Abbildung 52 sind alle Strecken des Gesamtnetzes dargestellt. In VISUM werden die primären Strecken in rot, die sekundären Strecken in gelb und die tertiären Strecken in violett dargestellt. Das tertiäre Netz, welches hier eine untergeordnete Rolle spielt, wurde in zwei Bereichen ausgearbeitet, alle restlichen Strecken dieses Typs sind nur als Einbindung auf das sekundäre Netz dargestellt. Der gesamte Untersuchungsbereich des Modells erstreckt sich auf einer Fläche von circa 8 mal 8 Kilometern.

**Abbildung 52: Gesamtnetz abgebildet in Visum (Teil von Singapur)**

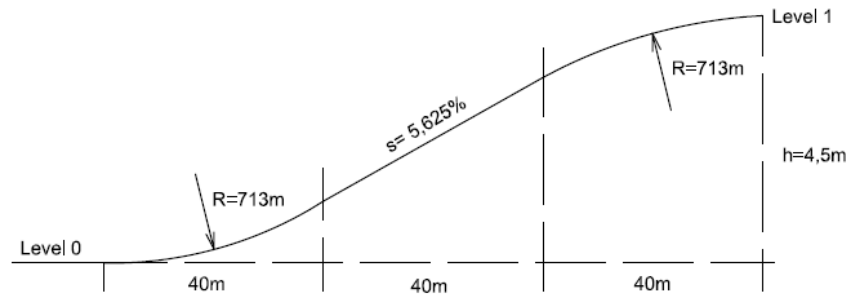


Abbildung 54: Ausbildung einer Rampe im Schnittbereich sekundär/sekundär

Das zweite Konstruktionsdetail eines solchen Knotenpunktes betrifft die Kurve. Diese wird, wie im Straßenbau üblich, mit Übergangsbögen (Klothoiden) ausgebildet. Da dies aufgrund konstruktiver Gründe bei diesen Fahrbahnen nicht möglich ist, wird die Kurve durch zwei unterschiedlich große Korbbögen dargestellt. In diesem Fall besitzen die Korbbögen einen Radius von 60 und 30 Metern. Durch den kleinen Radius und die in den Richtlinien festgehaltene maximale Seitenbeschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ kann diese Kurve mit einer Geschwindigkeit von maximal 31 km/h befahren werden (siehe Abbildung 55). [RVS 03.01.11, 2012]

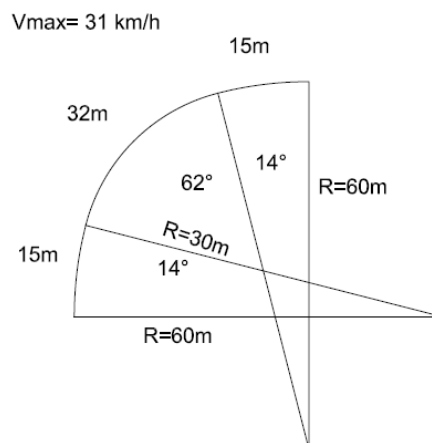


Abbildung 55: Ausbildung einer Kurve im Schnittbereich sekundär/sekundär

7.2.3 Bezirke und deren Anbindungen

Um Ziel- und Quellorte von Personen zu definieren, wurden Bezirke erstellt. Diese sind so angeordnet, dass später die Anbindung an das Streckennetz innerhalb von etwa 600 Metern möglich ist. Diese Länge und somit die Anzahl der Bezirke sollen gewährleisten, dass am Gesamtnetz die Übersicht bewahrt werden kann. Abbildung 56 zeigt die Anordnung der insgesamt 29 Bezirke im Gesamtnetz.

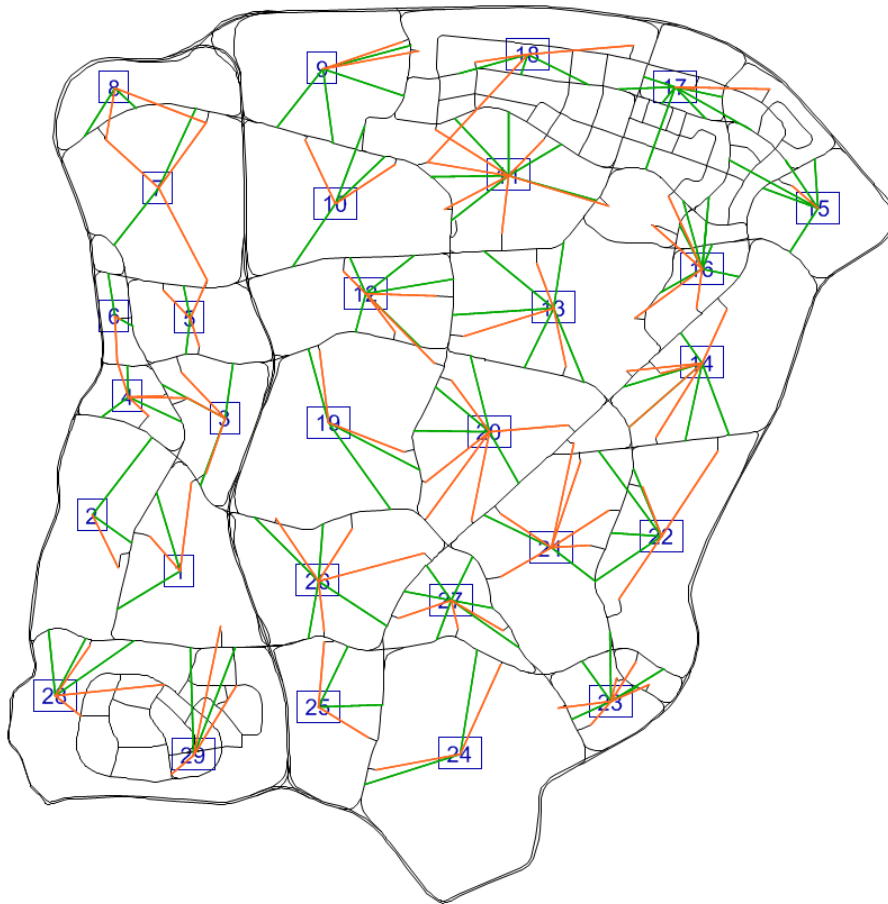


Abbildung 56: Bezirke und Anbindungen

Anbindungen gehen immer von Bezirken aus. Von hier sollen Personen in das Straßennetz des Individualverkehrs bzw. an den Haltestellen des öffentlichen Netzes eingebunden werden.

In Abbildung 56 sind auch die Anbindungen an das Gesamtnetz zu sehen. Hierbei gehen von jedem Bezirksschwerpunkt Anbindungen zum tertiären Netz (orange) und zu den Haltestellen (grün) aus. Die Längen der Anbindungen an das tertiäre Netz sowie an das ÖV-Netz betragen durchschnittlich 660 Meter. Die Fahrzeuge des IV können also nur über das tertiäre Netz einfahren.

7.2.4 Haltestellen und ÖV-Linien

Im Netz wurden Haltestellen mit einem Abstand von ca. 500 bis 600 Meter angeordnet und somit ergab sich eine Anzahl von 103 Haltestellen im gesamten Modell (siehe Abbildung 57). Diese Haltestellen sollen später in der mikroskopischen Simulation als Bucht ausgeführt werden, um den Verkehr auf der Hauptstrecke nicht zu behindern.

Haltestellen befinden sich ausschließlich im sekundären Netz, da das primäre Netz einen Streckentyp darstellt, in welchem es möglichst wenig Unterbrechungen und Störfaktoren gibt (wie auf Autobahnen).

Im gesamten Netz wurden drei Linien erstellt, deren Routen jeweils von einem Punkt starten und im Startpunkt einer anderen Linie enden. Linie A und Linie C besitzen je drei und die Linie B vier unterschiedliche Routen. Dadurch wird die Abdeckung aller sekundären Strecken, auf welchen sich die Haltestellen für die ÖV-Linien befinden, sichergestellt.

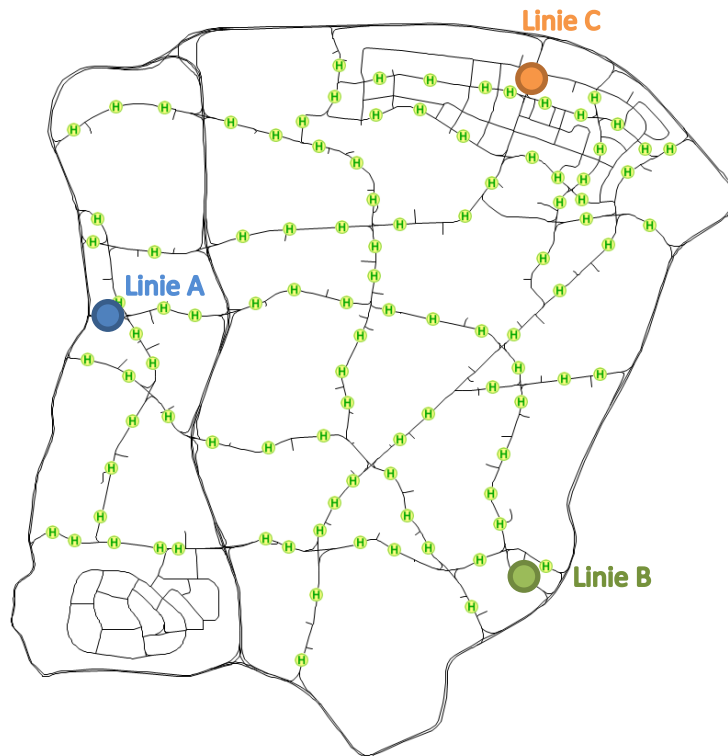


Abbildung 57: Startpunkte der Linienrouten je Linie

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 58 bis Abbildung 60) zeigen die jeweiligen Linienrouten der Linien A, B und C.

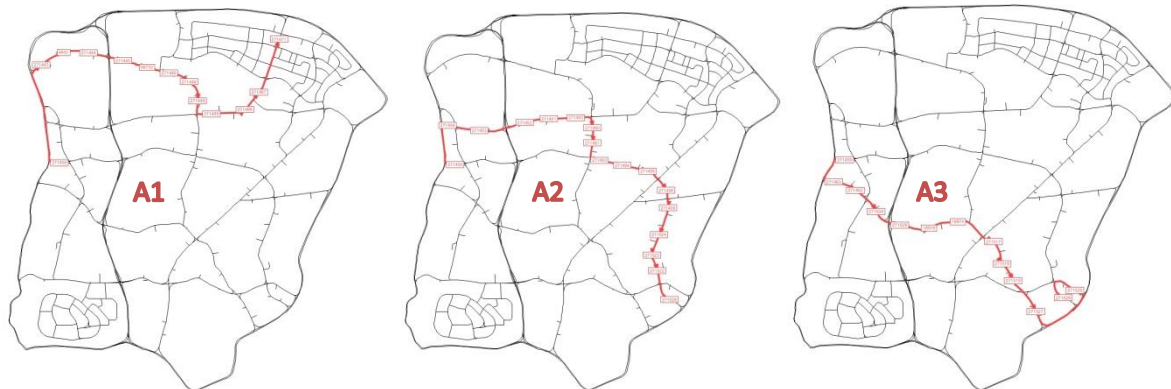


Abbildung 58: Linienroute A1, A2 und A3

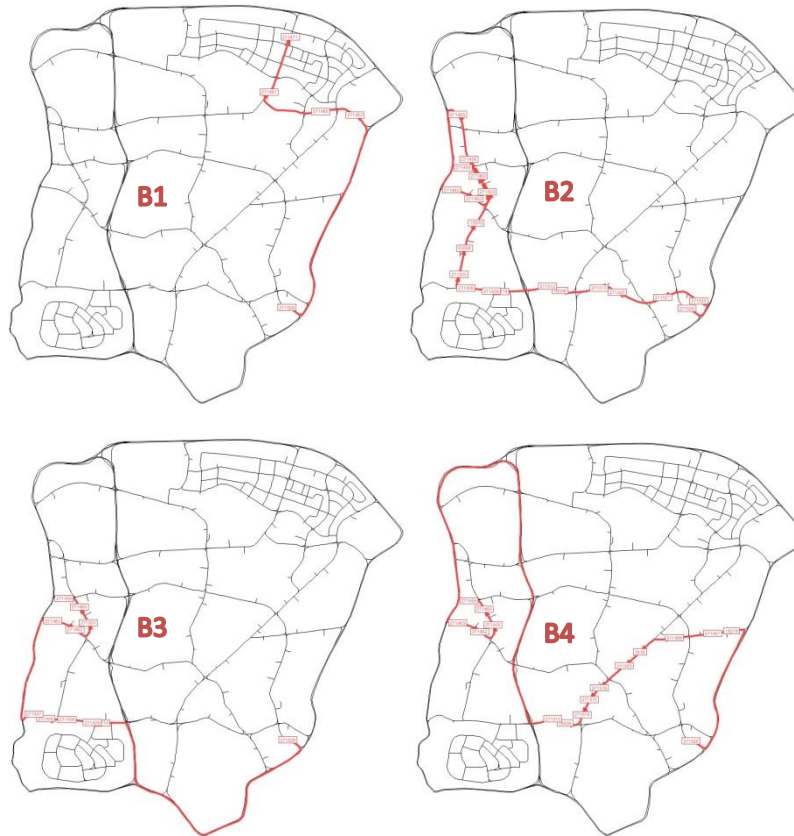


Abbildung 59: Linienroute B1, B2, B3 und B4

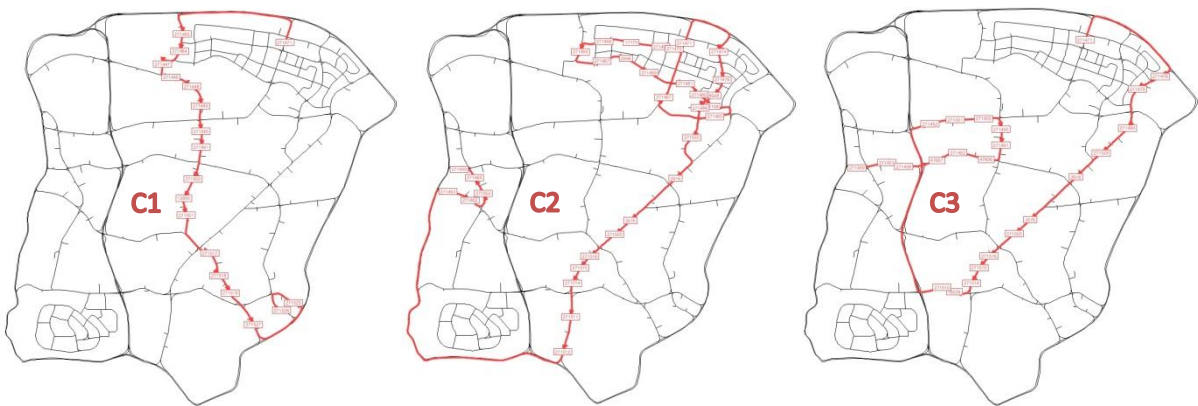


Abbildung 60: Linienroute C1, C2 und C3

Auf diesen Linienrouten sollen Podcars verkehren. Da Podcars die Eigenschaft besitzen, nicht an jeder Haltestelle halten zu müssen, sondern direkt zur gewünschten Destination zu fahren, wird dies später in der mikroskopischen Simulation durch „Auslassen der Haltestelle möglich“ dargestellt.

Fahrplan

Es sollte nun alle 10 Sekunden ein Fahrzeug pro Linienroute am Anfangspunkt der jeweiligen Linie starten, um das Netz mit Podcars zu versorgen. Dies bedeutet eine Anzahl von 360 Fahrzeugen pro Stunde pro Linienroute und insgesamt verkehren pro Stunde 3600 Fahrzeuge im Netz. Als ÖV sollen

Systemen (autonome Fahrzeuge) zurückgelegt werden. Aus diesen Überlegungen ergeben sich nun zwei Nachfragematrizen – eine für den ÖV und eine für den IV.

Da es sich bei der Nachfragematrix um die Anzahl der Fahrten pro Einwohner handelt, wurden die Besetzungsgrade der autonomen Fahrzeuge festgelegt, um die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde zu ermitteln.

Durch eine gleichmäßige Aufteilung der Fahrzeugtypen *aut1* bis *aut5*, erhält man jeweils 40% Zwei- und Viersitzer und 20% Zehnsitzer (siehe Tabelle 7.3). Dies ergibt eine durchschnittliche Sitzanzahl von 4,4 Sitzen pro Fahrzeug. Geht man von einem Auslastungsgrad der Fahrzeuge von 40% aus, so ergibt sich ein Besetzungsgrad von 1,8 Personen pro Fahrzeug.

Tabelle 7.3: Durchschnittliche Anzahl der Sitze autonomer Fahrzeuge

Fahrzeugtyp	Anzahl Sitzplätze	Verteilung
aut1	2	0.4
aut2	2	
aut3	4	0.4
aut4	4	
aut5	10	0.2
Durchschnitt	4.4 Sitze pro Fahrzeug	

7.3 Ergebnisse der makroskopischen Netzanalyse

Die Verkehrsumlegung des IVs erfolgte mithilfe des Lernverfahrens und die ÖV-Umlegung wurde „fahrplanfein“ durchgeführt. Das Lernverfahren bildet den Lernprozess der Verkehrsteilnehmer bei der Benutzung des Netzes ab und die Informationen über die letzte Fahrt bleiben für die neue Routensuche erhalten. Fahrplanfein bedeutet, dass alle Fahrten der ÖV-Linien mit ihren genauen Abfahrts- und Ankunftszeiten berücksichtigt werden. Diese Verkehrsumlegungen erfolgen für die Spitzenstunde mit 100% der Nachfrage, sowie mit einer Nachfrage von nur 50% und 33% damit anschließend im mikroskopischen Modell die Unterschiede zwischen einem flüssigen und gestauten Verkehrsfluss untersucht und analysiert werden können.

7.3.1 Haltestellen

Abbildung 62 zeigt das durchschnittliche Aussteigeverhalten der Personen an den 103 Haltestellen im Netz. An jeder Haltestelle gibt es einen Durchschnitt von je 9% Quelleinsteigern und Zielaussteigern. Außerdem steigen etwa 13% um und 69% der Passagiere steigen weder ein noch aus, sondern fahren durch.

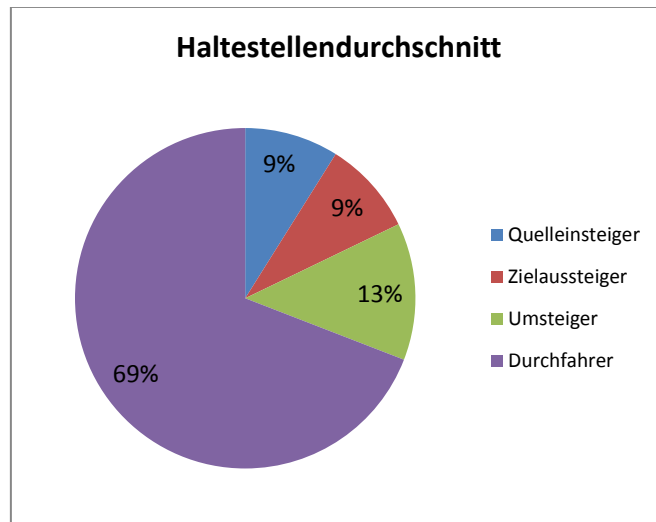


Abbildung 62: Durchschnittliches Aussteigeverhalten pro Haltestelle

7.3.2 Auslastung des Netzes

Wie bereits bei den Streckentypen in Kapitel 7.2.1 beschrieben, wurden die Kapazitäten der Strecken im Gesamtnetz übernommen. Folgende Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen nun die Auslastung aller Strecken, also die aktuelle Verkehrsstärke bezogen auf die Kapazität, bei 100% sowie 50% der Nachfrage.

Anfangs zeigte sich eine inhomogene Verteilung der Auslastung der Strecken. Eine hohe Auslastung konzentrierte sich stark auf die sekundären Strecken und primäre Strecken wurden kaum befahren. Um den Widerstand der Strecken bei Erreichen der Kapazität zu erhöhen, wurde der Funktionsparameter β der CR-Funktion (BPR) (siehe Kapitel 3.3) gesteigert. So wurden Alternativrouten gewählt und es konnte eine gleichmäßige Verteilung des Verkehrs auf alle Strecken erzielt werden.

Die Abbildung mit 100%iger Nachfrage zeigt, dass es stellenweise zur Überlastung einzelner Strecken (dunkelrote Balken, Auslastung > 100%) kommt, die gewählten Routen jedoch gleichmäßig aufgeteilt werden.

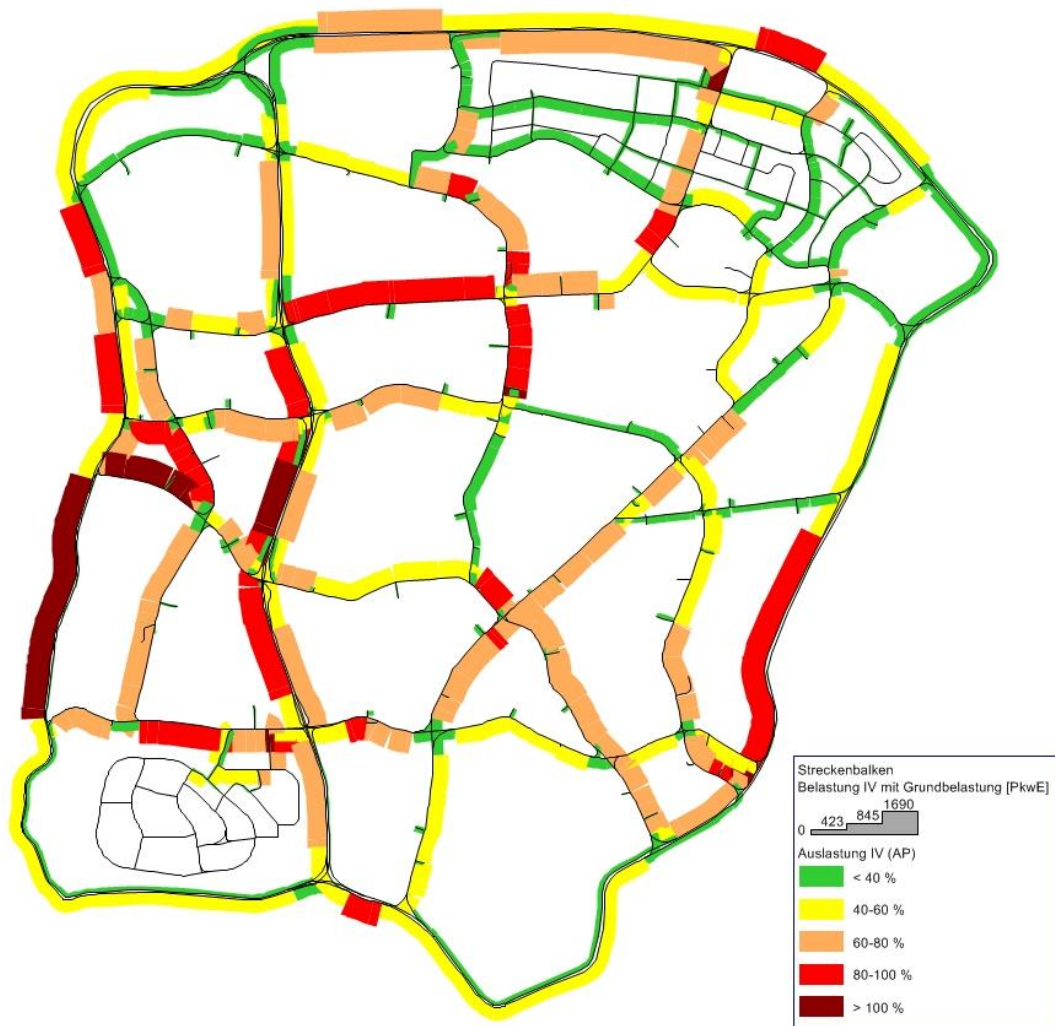


Abbildung 63: Auslastung IV+ÖV im Gesamtnetz (100% Nachfrage)

Die Abbildung mit 50% der Nachfrage zeigt ein deutlich weniger belastetes Gesamtnetz, jedoch werden ein paar Strecken immer noch bis zur Kapazitätsgrenze ausgelastet.

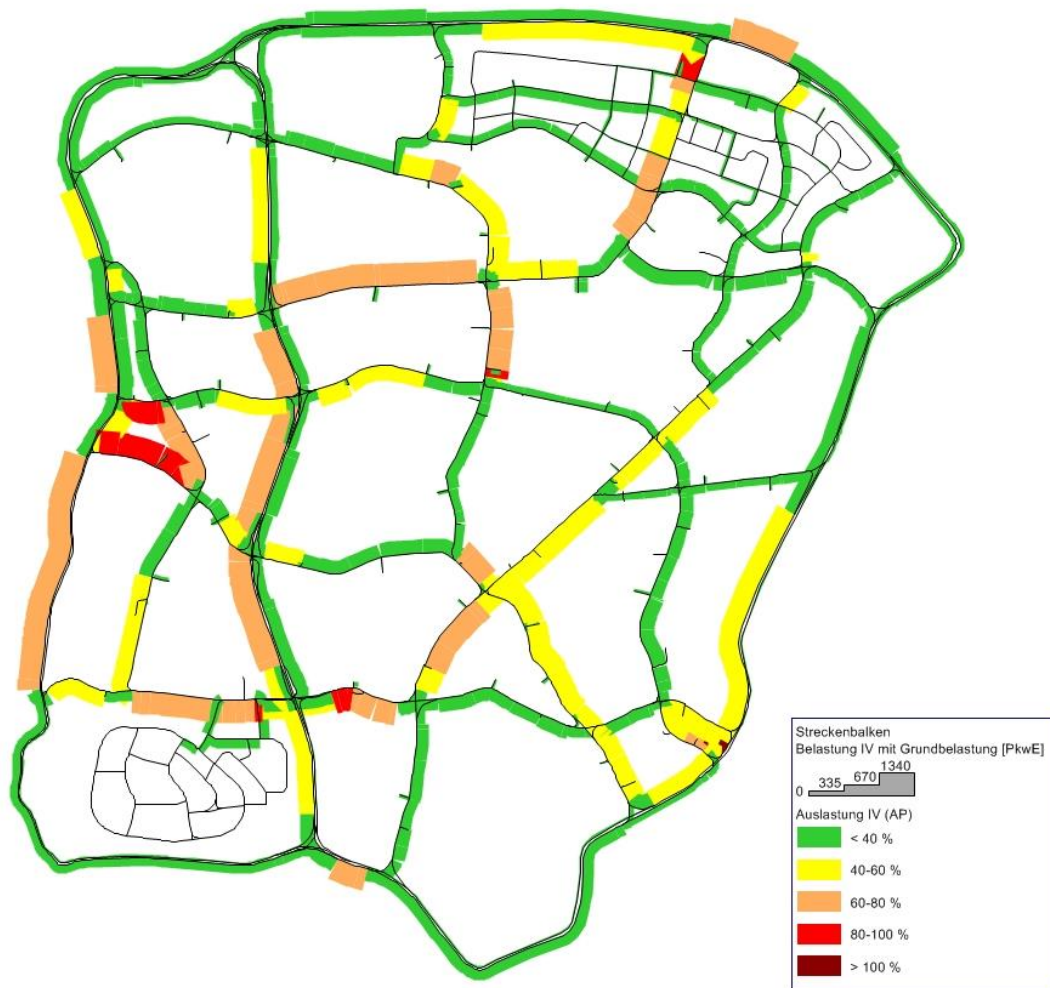


Abbildung 64: Auslastung IV+ÖV im Gesamtnetz (50% Nachfrage)

7.3.3 Geschwindigkeitsverteilung im Netz

Deutlich zu erkennen sind die niedrigen Geschwindigkeiten, vor allem im sekundären Netz von unter 20 km/h bei einer 100%-igen Nachfrage. Der äußere Ring mit den primären Strecken kann mit über 50 km/h befahren werden, welches ein schnelles Reisen ermöglicht (siehe Abbildung 65).

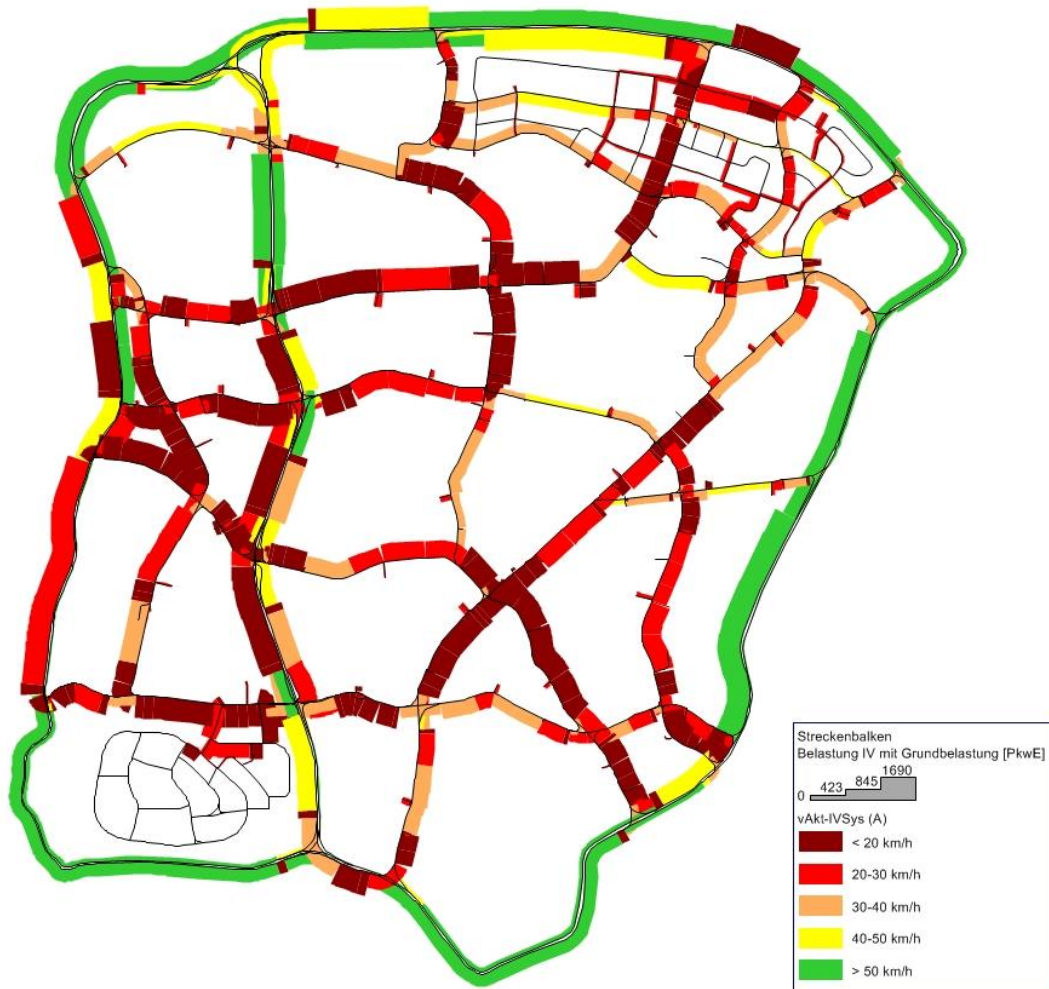


Abbildung 65: Geschwindigkeiten im Gesamtnetz (100% Nachfrage)

Abbildung 66 stellt die Geschwindigkeiten im Netz bei einer Nachfrage von 50% dar. Es ergeben sich nun deutlich höhere Geschwindigkeiten, jedoch sind immer noch Strecken im Netz vorhanden, auf denen es nicht möglich ist über 20 km/h zu verkehren. Auch hier sind auf dem äußeren Ring wieder Geschwindigkeiten von über 50 km/h möglich. Diese Abbildung deutet darauf hin, dass es auch bei einer 50%-igen Nachfrage noch immer nicht zu einem völlig frei fließenden Verkehr kommen wird.

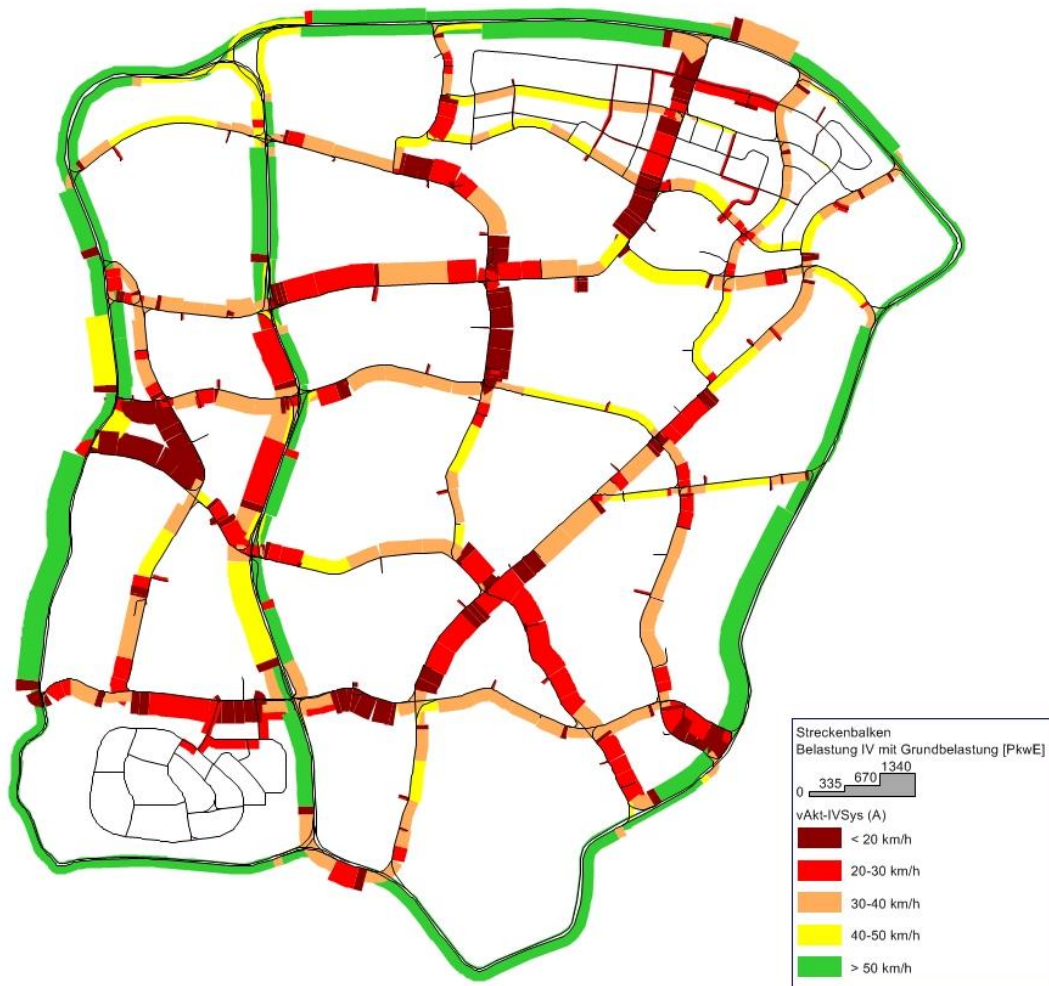


Abbildung 66: Geschwindigkeiten im Gesamtnetz (50% Nachfrage)

7.4 Aufbau eines mikroskopischen Netzes

Es ist nun möglich, ein abstrahiertes Netzmodell (ANM) des VISUM-Netzes zu erzeugen, das anschließend in VISSIM eingelesen und als mikroskopisches Modell weiter bearbeitet werden kann. Beim Export können die Netzdaten, sowie die Routen und Matrizen umgewandelt werden. Außerdem kann hier die Länge der Haltestellen, sowie die Ausführung der Haltestellen als Bucht angegeben werden.

7.4.1 Haltestellen

Abbildung 67 zeigt die mikroskopische Ausführung der Haltestellenbucht. Die Haltestellenbucht hat eine Länge von 100 Metern auf denen der Halt ab 20 Meter vor der Ausfahrt beginnt. Die Haltestelle selbst ist 60 Meter lang und endet somit 20 Meter vor der Einfahrt der Haltebucht. Da alle Linien in

die Haltebucht einfahren, auch jene die gerade keinen Halt in der Station machen müssen, wurde, um einen Rückstau zu vermeiden, eine Überholmöglichkeit durch einen zweiten Fahrstreifen ermöglicht.

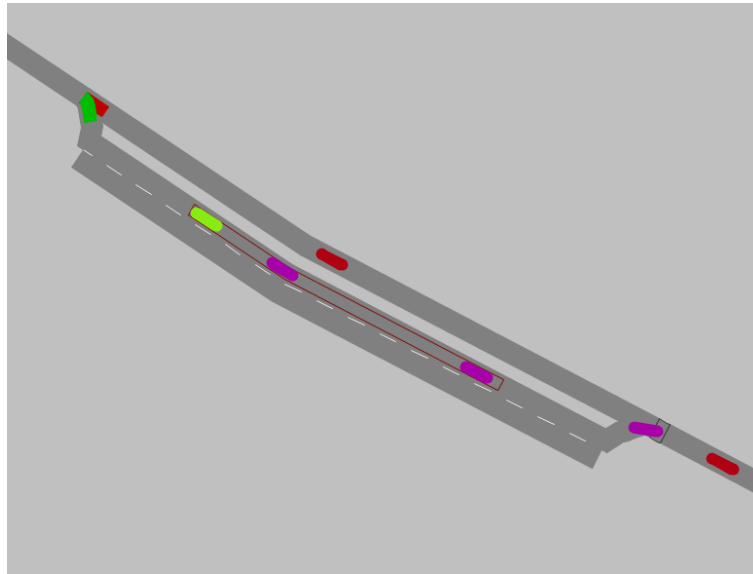


Abbildung 67: Zweistreifige Haltebucht

In einer Haltestelle können bis zu 7 Podcars hintereinander halten. Der Taktfahrplan der makroskopischen Simulation wurde übernommen. Die Aufenthaltszeit je Podcar und Halt errechnet sich aus einer Aussteige- bzw. Einsteigezeit von drei Sekunden je Fahrgast, sowie einer Basisverlustzeit von fünf Sekunden. Es wird davon ausgegangen, dass die Ein- und Ausstiegsmöglichkeit durch zwei unterschiedliche Türen erfolgt. Die Kapazität eines Podcars beträgt 10 Fahrgäste.

Die Anzahl der Einsteiger je Haltestelle wurden aus der makroskopischen Simulation errechnet und den Haltestellen in VISSIM zugeordnet. Die Aussteiger mussten anteilmäßig angegeben werden, und so wurden alle Haltestellen einer Linie herangezogen und der Aussteigeranteil auf alle Haltestellen gleichmäßig aufgeteilt (Ausnahme: erste Haltestelle jeder Linienroute erhält keine Aussteiger). Es gibt außerdem die Möglichkeit für Podcars an Haltestellen nicht zu halten. Dies ist der Fall wenn gerade keine Ein- bzw. Aussteiger vorhanden sind.

Aufgrund des Verkehrsflusses wurden nicht bei allen Linienrouten alle Haltestellen in deren Route miteingebunden und so ergaben sich folgende Halte pro Linie (siehe Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4: Aussteigeranteil pro Linie und Route

Liniennummer	Linienname	Linienroute	Personenkilometer	Anzahl Haltestellen	Anteil Aussteiger
1	Podcar A	Linie 1	16 203 415	10	11.1%
2	Podcar A	Linie2	17 271 458	15	7.1%
3	Podcar A	Linie 3	9 622 700	13	8.3%
4	Podcar B	Linie 1	7 306 007	5	25.0%
5	Podcar B	Linie 2	11 124 799	19	5.6%
6	Podcar B	Linie 3	15 305 565	10	11.1%
7	Podcar B	Linie 4	1 831 319	13	8.3%
8	Podcar C	Linie 1	8 035 026	16	6.7%
9	Podcar C	Linie 2	11 676 055	30	3.4%
10	Podcar C	Linie 3	24 068 002	23	4.5%

Im Rahmen der Simulation kristallisierte sich heraus, dass eine maximale Anzahl von 1300 Einsteigern pro Haltestelle abgewickelt werden kann. Da es bei einigen Haltestellen deutlich mehr Einsteiger gibt, wurde die Anzahl an diesen angepasst. Für weitere Untersuchungen und Simulationen für welche mehr Einsteiger pro Haltestelle vorhanden sein sollen, müssen Adaptierungen hinsichtlich der Geometrie der Haltestellen vorgenommen werden.

7.4.2 Knotenpunkte

Für weitere Analysen wurden nun einzelne Knotenpunkte genauer betrachtet, welche in Abbildung 68 ersichtlich sind.

**Abbildung 68: Exemplarische Knotenpunkte**

Die Geometrien der Knotenpunkte finden sich in Kapitel 7.2.2 beschrieben und werden im mikroskopischen Verkehrsmodell angewandt in Abbildung 69 dargestellt. In den Kurven sind außerdem die Langsamfahrbereiche veranschaulicht.



Abbildung 69: Kreuzungspunkt von zwei sekundären Strecken

7.5 Auswertungen der mikroskopischen Simulation

Wie schon bei der Auswertung des makroskopischen Netzes werden auch im mikroskopischen Modell unterschiedliche Nachfragen untersucht. Zusätzlich zu der Nachfrage mit 100% und 50% kommt bei dieser Auswertung auch noch eine 33%-ige Nachfrageanalyse hinzu, um auch einen völlig freien Verkehrsfluss darstellen zu können. Die Nachfrage entspricht dem Zufluss. Alle Auswertungen erfolgten nach der Simulation mit fünf unterschiedlichen Zufallszahlen, wobei der Mittelwert dieser fünf Simulationen herangezogen wurde. Diese Simulationen wurden einerseits mit autonomen Fahrzeugen und Podcars durchgeführt und die in Kapitel 6.2.3 ermittelten Fahrverhaltensparameter der Strecke zugeordnet. Zusätzlich wurden zum Vergleich konventionelle Fahrzeuge getestet. Die Fahrverhaltensparameter wurden jenen der konventionellen Fahrweise angepasst. Die Podcars wurden in diesem Fall mit dem vorhandenen Takt und den Fahrzeuglängen und -eigenschaften beibehalten. Daraus ergeben sich 6 unterschiedliche Simulationsläufe für das mikroskopische Gesamtnetz (siehe Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Simulationsläufe

Simulation	1	2	3	4	5	6
Fahrzeugtyp	autonome Fz			konventionelle Fz		
Nachfrage	100%	50%	33%	100%	50%	33%

7.5.1 Gesamtnetz

Bei den am Gesamtnetz auszuwertenden Ergebnissen handelt es sich um die mittlere gefahrene Geschwindigkeit aller Fahrzeuge im Netz, die Anzahl der Fahrzeuge im Netz (jene, welche bereits den Weg zwischen Start und Ziel zurückgelegt haben und jene die sich noch im Netz befinden), die Wegstrecke, Reisezeit und Verlustzeit aller Fahrzeuge im Netz. Bei der Wegstrecke handelt es sich um die Anzahl der zurückgelegten Kilometer aller im Netz gewesenen und befindlichen Fahrzeuge in [Fz*km]. Die Reisezeit beschreibt jene Zeit, welche von allen im Netz gewesenen und befindlichen Fahrzeugen verbraucht wurde in [Fz*h]. Jene Zeit, in welcher die Fahrzeuge nicht ihre Wunschgeschwindigkeit fahren konnten, wird als Verlustzeit in [Fz*h] angegeben. Aus der Wegstrecke (TTD – Total Travel Distance) sowie der Reisezeit (TTS – Total Time Spent by vehicles in the network) können aufgrund der bekannten Streckenlänge neue Größen wie die Verkehrsstärke q (siehe Formel 9) und die Verkehrsdichte k (siehe Formel 10) berechnet werden.

Formel 9: Ermittlung der Verkehrsstärke über die Wegstrecke [Mühlich, 2014]

$$q = \frac{TTD}{t_{int} * L_{net}}$$

mit TTD ...Wegstrecke
 t_{int} ...Zeitintervall
 L_{net} ...Netzlänge

Formel 10: Ermittlung der Verkehrsdichte über die Reisezeit [Mühlich, 2014]

$$k = \frac{TTS}{t_{int} * L_{net}}$$

mit TTS ...Reisezeit

Das Zeitintervall, das hier betrachtet wird, beträgt eine Stunde und das gesamte, befahrene Netz (primär und sekundär) hat eine Länge von 167,7 Metern.

Die folgenden zwei Tabellen (Tabelle 7.6 und Tabelle 7.7) sollen einen Überblick über die ermittelten Netzkennwerte von autonomen und konventionellen Fahrzeugen bei unterschiedlichen Nachfragen geben. Außerdem zu sehen sind die Abweichungen der Werte in % der Nachfragen zueinander. Diese werden anschließend einzeln und in Diagrammen dargestellt genauer beschrieben (Abbildung 70 bis Abbildung 76).

Tabelle 7.6: Vergleich der autonomen Fahrzeuge bei unterschiedlicher Nachfrage

Autonome Fahrzeuge - Vergleich 100%, 50% und 33% Nachfrage								
Verkehrssystem	Nachfrage	mittlere Geschwindigkeit	Fahrzeuge im Netz	Verkehrsstärke	Verkehrsdichte	Gesamtwegstrecke	Gesamtreisezeit	Gesamtverlustzeit
		[km/h]	#	[Fz*h]	[Fz*km]	[km]	[h]	[h]
aut	100%	15.9	16334	544	35	91287	5828	4090
aut	50%	34.9	11872	567	16	95103	2726	917
aut	33%	39.1	9453	487	12	81645	2088	521
Abweichung 100-50		220%	73%	104%	47%	104%	47%	22%
Abweichung 50-33		112%	80%	86%	77%	86%	77%	57%
Abweichung 100-33		246%	58%	89%	36%	89%	36%	13%

Tabelle 7.7: Vergleich der konventionellen Fahrzeuge bei unterschiedlicher Nachfrage

Konventionelle Fahrzeuge - Vergleich 100%, 50% und 33% Nachfrage								
Verkehrssystem	Nachfrage	mittlere Geschwindigkeit	Fahrzeuge im Netz	Verkehrsstärke	Verkehrsdichte	Gesamtwegstrecke	Gesamtreisezeit	Gesamtverlustzeit
		[km/h]	#	[Fz*h]	[Fz*km]	[km]	[h]	[h]
konv	100%	12.5	14974	431	35	72248	5787	4362
konv	50%	26.3	10938	451	18	75709	2959	1470
konv	33%	25.2	8201	351	14	58803	2351	1186
Abweichung 100-50		210%	73%	105%	51%	105%	51%	34%
Abweichung 50-33		96%	75%	78%	79%	78%	79%	81%
Abweichung 100-33		202%	55%	81%	41%	81%	41%	27%

Abbildung 70 zeigt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nachfrage. Auf der linken Seite des Diagrammes (dunkle Balken) sind die Geschwindigkeiten der autonomen Fahrzeuge bei 100% Nachfrage (blau), 50% Nachfrage (rot) und 33% Nachfrage (grün) zu sehen. Die Geschwindigkeit bei einer hohen Nachfrage ist sehr gering (16 km/h) und kann durch die Verringerung der Nachfrage um 50% um über das Doppelte (35 km/h) gesteigert werden. Eine weitere Reduktion der Nachfrage von 50% auf 33% (Reduktion von insgesamt 66%) bewirkt eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit um 12% (39 km/h). Bei konventionellen Fahrzeugen, welche im Diagramm auf der rechten Seite durch die transparenten Balken dargestellt werden, kann man ebenso durch die Reduktion der Nachfrage eine Erhöhung der Geschwindigkeit verzeichnen. Bei weiterer Reduktion der Nachfrage bleibt die Geschwindigkeit in etwa gleich.

Betrachtet man nun autonome Fahrzeuge im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen so ist eine deutlich höhere Geschwindigkeit durch autonomes Fahren im Netz erreichbar.

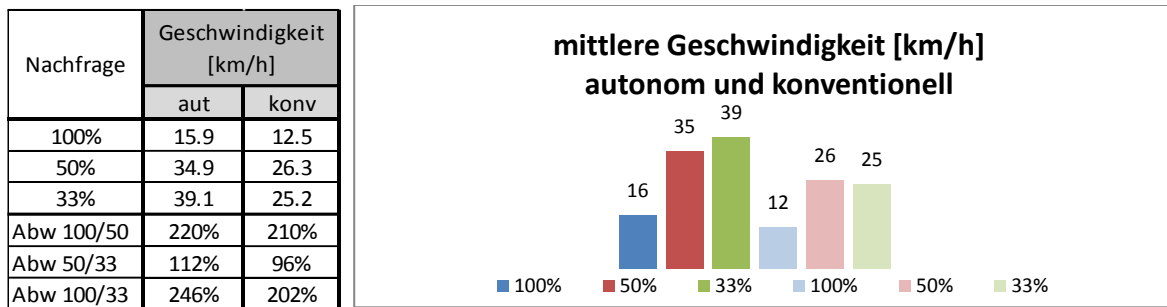


Abbildung 70: Mittlere Geschwindigkeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge

Die Anzahl der Fahrzeuge im Netz in Abhängigkeit der Nachfrage können der Abbildung 71 entnommen werden. Bei gleicher Nachfrage befinden sich mehr autonome Fahrzeuge als konventionelle im Netz, es sinken beide jedoch um 27% (aut: von 16.300 auf 11.900 Fahrzeuge; konv: von 15.000 auf 10.900 Fahrzeuge) bei Verringerung der Nachfrage von 100% auf 50%. Die Anzahl der Fahrzeuge im Netz sinkt weiter mit Abnahme der Nachfrage. Dass bei den konventionellen Fahrzeugen eine geringere Anzahl an Fahrzeugen im Netz vorhanden ist, lässt darauf schließen, dass sich der Verkehrsfluss staut und gar nicht alle durch den Zufluss bestimmten Fahrzeuge in das Netz einfahren können.

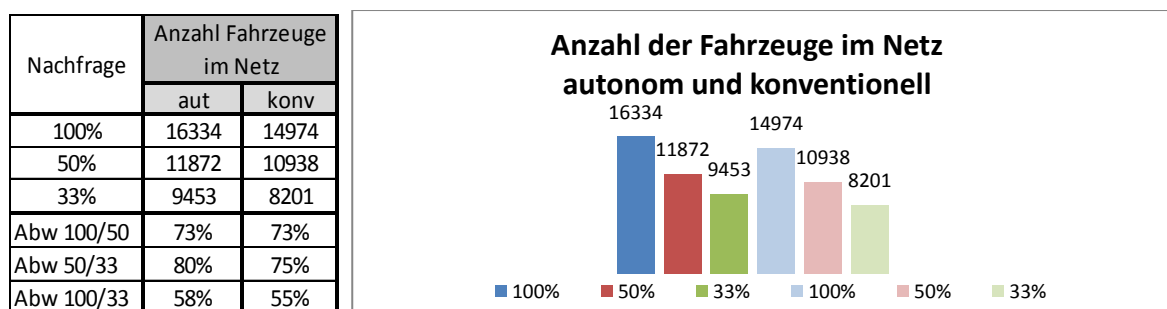


Abbildung 71: Anzahl der autonomen und konventionellen Fahrzeuge im Gesamtnetz

Die Wegstrecke und die damit verbundene Verkehrsstärke zeigen sich in Abbildung 72 und Abbildung 73. Die Verkehrsstärke steigt mit Abnahme des Zuflusses, was auf einen flüssigeren Verkehrsfluss hinweist (siehe q-k Bereich im Fundamentaldiagramm, Abbildung 14). Die Verkehrsstärke wird allerdings nur um 4% erhöht. Im weiteren Verlauf (weniger Zufluss) zeigt sich eine deutliche Abnahme der Wegstrecke von bis zu 11% in Bezug auf die 100%-ige Nachfrage.

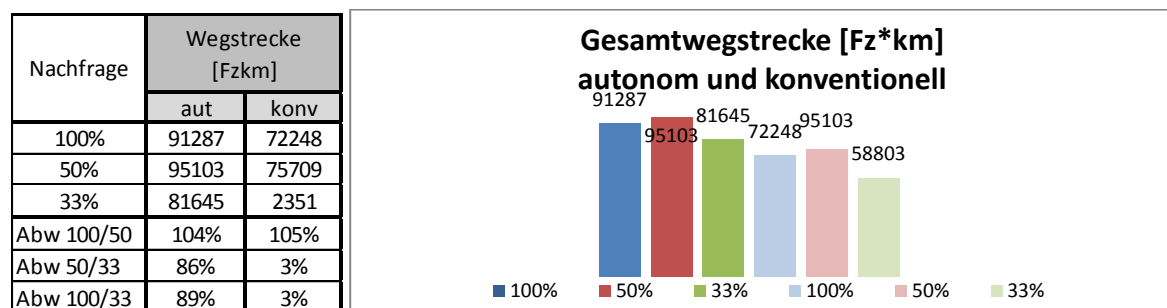


Abbildung 72: Gesamtwegstrecke autonomer und konventioneller Fahrzeuge

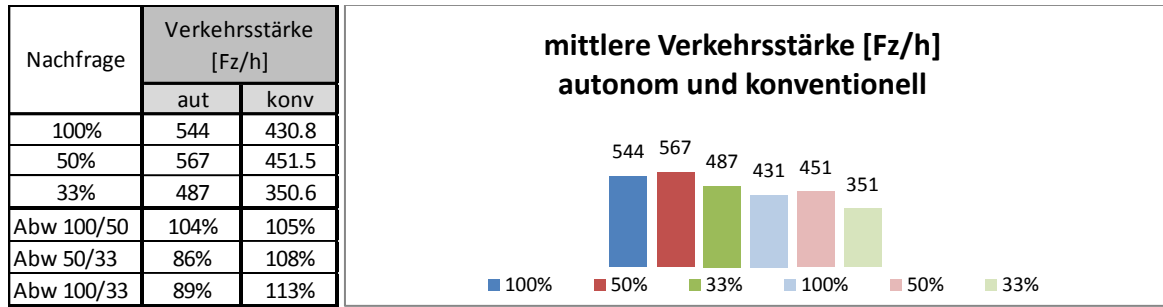


Abbildung 73: Mittlere Verkehrsstärke autonomer und konventioneller Fahrzeuge

Die zwei folgenden Abbildungen (Abbildung 74 und Abbildung 75) zeigen die Reisezeit aller Fahrzeuge im Netz sowie die damit verbundene Verkehrsdichte. Die Verkehrsdichte sinkt mit abnehmender Nachfrage, es zeigt sich jedoch bei geringeren Zuflüssen eine höhere Verkehrsdichte bei konventionellen Fahrzeugen, welche vermutlich auf das Fahrverhalten zurückzuführen ist.

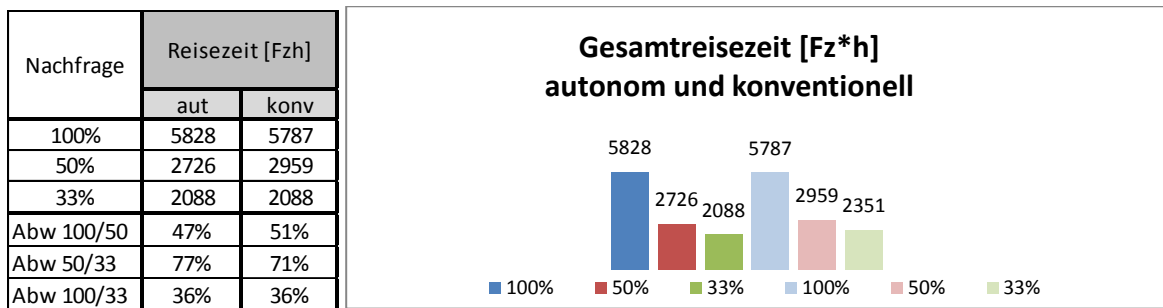


Abbildung 74: Gesamtreisezeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge

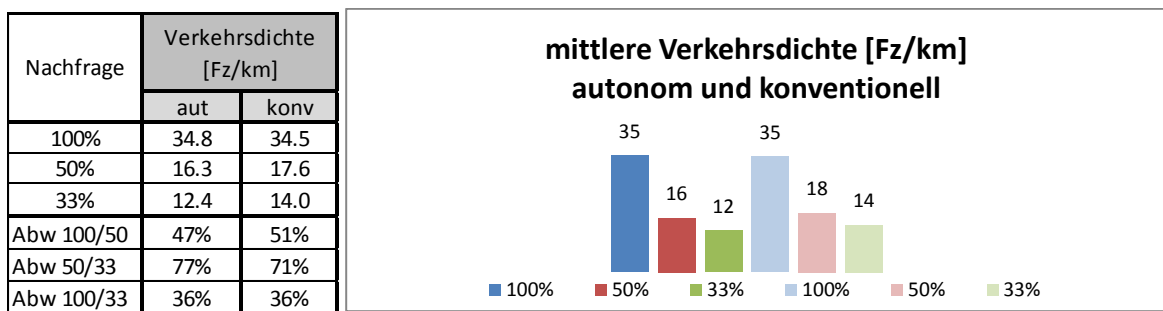


Abbildung 75: Mittlere Verkehrsdichte autonomer und konventioneller Fahrzeuge

Abbildung 76 zeigt die Verlustzeit aller Fahrzeuge im Netz, welche dann aufgezeichnet wird, sobald die Fahrzeuge nicht imstande sind, ihre Wunschgeschwindigkeit zu fahren. Bei 100% der Nachfrage wird eine sehr hohe Verlustzeit verzeichnet. Allerdings sinkt diese mit sinkender Nachfrage drastisch ab. Zu beachten ist jedoch, dass allgemein die Reisezeit sinkt und so natürlich auch die Verlustzeit sinken muss.

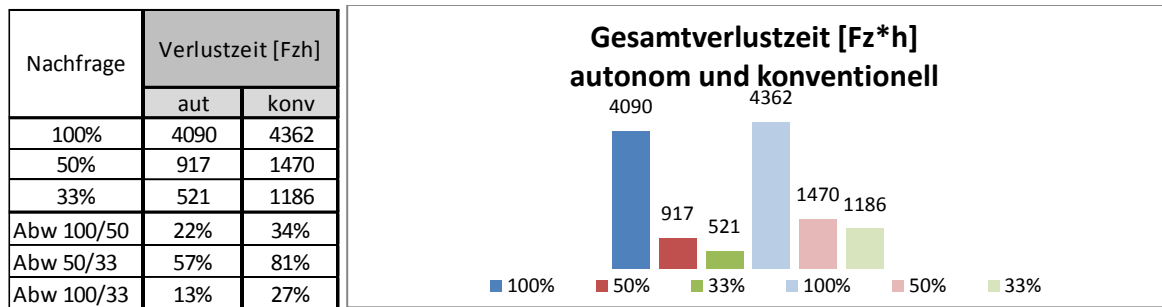


Abbildung 76: Gesamtverlustzeit autonomer und konventioneller Fahrzeuge

Die nächste Tabelle zeigt nun den Anteil der Verlustzeit im Vergleich zur Reisezeit bei autonomen und konventionellen Fahrzeugen. Bei hohem Zufluss ist der Anteil der Verlustzeit bei autonomen sowie auch bei konventionellen Fahrzeugen recht hoch (größer 70%). Sinkt nun der Zufluss auf die Hälfte, so reduziert sich der Anteil der Verlustzeit bei autonomen Fahrzeugen auf 34% wobei bei konventionellen Fahrzeugen immer noch eine Verlustzeit von 50% zu verzeichnen ist. Bei weiterer Reduktion des Zuflusses sinkt auch der Verlustzeitanteil bei autonomen Fahrzeugen, wohingegen diese bei konventionellen Fahrzeugen wieder ansteigt.

Tabelle 7.8: Anteil der Verlustzeit an der Reisezeit

Autonome Fahrzeuge			
Nachfrage	Reisezeit [Fz*h]	Verlustzeit [Fz*h]	Anteil Verlustzeit [%]
100%	5828	4090	70%
50%	2726	917	34%
33%	2088	521	25%
Konventionelle Fahrzeuge			
Nachfrage	Reisezeit [Fz*h]	Verlustzeit [Fz*h]	Anteil Verlustzeit [%]
100%	5787	4362	75%
50%	2959	1470	50%
33%	2088	1186	57%

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass es bei 100% Nachfrage einen gestauten Verkehr gibt, bei 33% handelt es sich um flüssigen Verkehr. Bei 50% Nachfrage liegt der Verkehrsfluss im Bereich des Knicks im q-k Diagramm.

Tabelle 7.9: Vergleich der Verkehrsstärken autonomer und konventioneller Fahrzeuge

Nachfrage	Verkehrsstärke [Fz/h]		
	aut	konv	Abweichung
100%	544	430.8	126%
50%	567	451.5	126%
33%	487	350.6	139%

Abschließend kann zur Gesamtnetzauswertung gesagt werden, dass eine deutliche Leistungssteigerung aufgrund von autonom fahrenden Fahrzeugen möglich ist und Reisezeiten und damit die beinhalteten Verlustzeiten reduziert werden können. Außerdem können sich um bis zu 39% mehr Fahrzeuge pro Stunde (Verkehrsstärke) im Netz aufhalten (siehe Tabelle 7.9).

7.5.2 Knoten

Zwei Kreuzungspunkte von sekundären Strecken wurden, wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, einer genaueren Betrachtung und Analyse unterzogen. Je Knoten ergeben sich so zwei Haupt- und zwei Nebenfahrbahnen. Am Knotenpunkt 1 entspricht die Hauptfahrbahn H1 mit der zugehörigen Nebenfahrbahn N5 dem Einmündungsbereich a und die zweite Hauptfahrbahn H4 mit der Nebenfahrbahn N2 dem Einmündungsbereich b. Der Knotenpunkt 2 setzt sich aus der Hauptfahrbahn H10 mit der Nebenfahrbahn N8 (Einmündungsbereich a) sowie der Hauptfahrbahn H7 mit der Nebenfahrbahn N11 (Einmündungsbereich 2b) zusammen (siehe Abbildung 77).



Abbildung 77: Knotenpunkt Nr. 1 und Nr.2

In Tabelle 7.10 sind die Ergebnisse des Knotenpunktes 1 des Einmündungsbereiches a unterschiedlicher Nachfragen dargestellt. Außerdem wird unterschieden in autonome und konventionelle Fahrzeuge. Diese Tabelle zeigt, dass die meisten Fahrzeuge aus dem Nordosten kommen und im Vergleich nur sehr wenige Abbieger von Nordwesten. Die Wunschgeschwindigkeit kann von allen Fahrzeugen gefahren werden, es zeigt sich jedoch bei den konventionellen Fahrzeugen – bei gleicher Nachfrage – ein deutlich geringerer Verkehrsfluss.

Tabelle 7.10: Ergebnisse Knotenpunkt 1 – Einmündungsbereich a

autonome Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	669	Fz/h	4.2	852	Fz/h	9.4	830	Fz/h	9.8
q _N	158	Fz/h	1.0	90	Fz/h	1.0	85	Fz/h	1.0
q _{Ges}	827	Fz/h		943	Fz/h		915	Fz/h	
v	49.6	km/h		49.9	km/h		49.9	km/h	

konventionelle Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	263	Fz/h	2.7	416	Fz/h	5.3	312	Fz/h	3.7
q _N	97	Fz/h	1.0	79	Fz/h	1.0	84	Fz/h	1.0
q _{Ges}	360	Fz/h		495	Fz/h		396	Fz/h	
v	46.3	km/h		46.8	km/h		47.0	km/h	

Beim Einmündungsbereich b lassen sich deutlich ausgeglicheneren Verhältnisse von q_H:q_N verzeichnen als bei Variante a. Die Geschwindigkeiten sind im Vergleich leicht reduziert, es kann aber immer noch von einem flüssigen Verkehrsfluss gesprochen werden.

Tabelle 7.11: Ergebnisse Knotenpunkt 1 – Einmündungsbereich b

autonome Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	232	Fz/h	1.0	303	Fz/h	1.9	378	Fz/h	2.3
q _N	269	Fz/h	1.2	162	Fz/h	1.0	164	Fz/h	1.0
q _{Ges}	501	Fz/h		465	Fz/h		542	Fz/h	
v	48.3	km/h		49.5	km/h		49.4	km/h	

konventionelle Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	175	Fz/h	1.2	334	Fz/h	2.7	391	Fz/h	3.7
q _N	149	Fz/h	1.0	123	Fz/h	1.0	106	Fz/h	1.0
q _{Ges}	324	Fz/h		457	Fz/h		497	Fz/h	
v	44.0	km/h		47.1	km/h		46.9	km/h	

Beim Knotenpunkt 2 handelt es sich um einen Kreuzungspunkt mit deutlich höheren Verkehrsstärken als bei Knotenpunkt 1. Tabelle 7.12 zeigt die Ergebnisse des Knotenpunktes 2, Einmündungsbereich a, welche erkennen lässt, dass sowohl konventionelle als auch autonome Fahrzeuge nicht die Wunschgeschwindigkeit erreichen können, aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens. Die Verhältnisse von q_H:q_N bewegen sich im Bereich von 1:1 bis 2:1.

Tabelle 7.12: Ergebnisse Knotenpunkt 2 – Einmündungsbereich a

autonome Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	1009	Fz/h	1.8	972	Fz/h	1.7	753	Fz/h	1.0
q _N	549	Fz/h	1.0	572	Fz/h	1.0	775	Fz/h	1.0
q _{Ges}	1559	Fz/h		1544	Fz/h		1528	Fz/h	
v	35.8	km/h		35.8	km/h		36.3	km/h	

konventionelle Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	616	Fz/h	1.7	697	Fz/h	1.5	648	Fz/h	1.2
q _N	362	Fz/h	1.0	472	Fz/h	1.0	525	Fz/h	1.0
q _{Ges}	978	Fz/h		1169	Fz/h		1173	Fz/h	
v	33.8	km/h		35.2	km/h		33.8	km/h	

Beim Einmündungsbereich b, bei welchem der Hauptstrom von Westen nach Osten und der Nebenstrom von Norden nach Osten fließt, ist das Verhältnis von Haupt- zu Nebenstrom genau umgekehrt, welcher im Bereich von 1:1 bis 1:2 liegt. Die Geschwindigkeiten sind hier deutlich höher und autonome Fahrzeuge können bei einer geringen Nachfrage auch annähernd die Wunschgeschwindigkeit erreichen.

Tabelle 7.13: Ergebnisse Knotenpunkt 2 – Einmündungsbereich b

autonome Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	404	Fz/h	1.0	326	Fz/h	1.0	264	Fz/h	1.0
q _N	567	Fz/h	1.4	504	Fz/h	1.5	493	Fz/h	1.9
q _{Ges}	971	Fz/h		829	Fz/h		757	Fz/h	
v	47.4	km/h		48.5	km/h		49.2	km/h	

konventionelle Fahrzeuge									
Nachfrage									
	100%		Verh	50%		Verh	33%		Verh
q _H	342	Fz/h	1.0	311	Fz/h	1.0	242	Fz/h	1.0
q _N	343	Fz/h	1.0	350	Fz/h	1.1	482	Fz/h	2.0
q _{Ges}	685	Fz/h		660	Fz/h		724	Fz/h	
v	43.2	km/h		45.0	km/h		45.8	km/h	

Vergleich autonome und konventionelle Fahrzeuge

Die absolute Anzahl an Fahrzeugen, welche die Knotenpunkte passieren, sowie deren Geschwindigkeiten, sind bei autonomen Fahrzeugen immer höher als bei konventionellen Fahrzeugen bei gleichen Bedingungen des Zuflusses bzw. der Nachfrage. Die nachfolgende Tabelle

7.14 zeigt den genauen Vergleich von autonomen und konventionellen Fahrzeugen an Knotenpunkten.

Tabelle 7.14: Verkehrsstärke autonomer und konventioneller Fahrzeuge im Vergleich

Knoten	Verkehrsstärke								
	100% Nachfrage			50% Nachfrage			33% Nachfrage		
	aut	konv	Abwei- chung	aut	konv	Abwei- chung	aut	konv	Abwei- chung
	[Fz/h]	[Fz/h]		[Fz/h]	[Fz/h]		[Fz/h]	[Fz/h]	
1a	827	360	230%	943	495	191%	915	396	231%
1b	501	324	155%	465	457	102%	542	497	109%
2a	1559	978	159%	1544	1169	132%	1528	1173	130%
2b	971	685	142%	829	660	126%	757	724	105%

Im Schnitt aller Knoten und Nachfragen kommt es zu einer Erhöhung der Verkehrsstärke durch autonome Fahrzeuge von etwa 50%. Bei der Betrachtung des Gesamtnetzes zeigte sich eine Erhöhung der Verkehrsstärke um 39% und bei herausgelösten Knotenpunkten, wie es die Teilnetze (siehe Kapitel 6) widerspiegeln, etwa 70%.

Vergleich mit Einmündungen mit Verflechtungsbereich (Teilnetz 3)

Verglichen mit Teilnetz 3 (Einmündung mit Verflechtungsbereich) zeigt sich bei der Betrachtung einzelner Knoten eines Gesamtnetzes deutlich weniger Verkehrsstärke. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Knoten in einem Gesamtnetz immer durch benachbarte Knoten und deren Verkehrsfluss beeinträchtigt werden.

Allgemein zeigen die Untersuchungen am Gesamtnetz, dass durch die Verwendung von autonomen Fahrzeugen eine höhere Verkehrsstärke auftritt ohne dabei den Verkehrsfluss zu beeinträchtigen, sowie höhere Geschwindigkeiten gefahren werden können. Aufgrund der komplexen und individuellen Struktur eines jeden Straßennetzes, kann aus diesem Grund keine generelle Aussage über die Steigerung der Leistungsfähigkeit getroffen werden.

8 Schlussfolgerungen

Das letzte Kapitel beschreibt zusammenfassend die vorliegende Masterarbeit, beinhaltet das Fazit und gibt einen Überblick über mögliche, noch weiter zu bearbeitende Schritte im Bereich der Kapazitätsanalyse autonomer Fahrzeuge.

8.1 Zusammenfassung

Diese Masterarbeit setzte sich zum Ziel, die Leistungsfähigkeit von autonomen Fahrzeugen auf unterschiedlichen Streckentypen zu ermitteln. Dazu wurden zuerst IV- und ÖV-ähnliche Fahrzeuge (autonome Fahrzeug und Podcars) gemeinsam mit dem Kompetenzzentrum Virtuelles Fahrzeug (ViF) mit unterschiedlichen Längen, Beschleunigungs- und Verzögerungswerten sowie Anzahl an Sitzplätzen definiert. Diese wurden in der gesamten weiteren Arbeit für Analysen und Auswertungen angewendet. Die weitere Vorgehensweise gliederte sich in zwei große Teile und zwar die Leistungsfähigkeitsanalyse am Teilnetz und die Leistungsfähigkeitsanalyse am Gesamtnetz.

Für die Analyse am Teilnetz wurden zuerst drei unterschiedliche Strecken in einem mikroskopischen Verkehrsmodellprogramm (VISSIM) entwickelt. Zum einen handelt es sich um eine freie Strecke mit nur einer Fahrbahn, welche keine Einmündungen und weiteren Zuflüsse besitzt. Das zweite Teilnetz stellt eine Strecke mit einer Einmündung dar, wobei diese keine Verflechtungsstrecke besitzt. Das dritte Teilnetz ist ebenfalls eine Strecke mit Einmündung, jedoch gibt es einen Verflechtungsbereich am Ende der Einmündung. An diesen Teilnetzen wurden nun die in VISSIM implementierten Fahrverhaltensparameter variiert, um jene Kombination zu ermitteln, bei welcher der größte Verkehrsfluss gemessen werden kann. Der Zufluss der freien Strecke war höher als die gemessene Verkehrsstärke und es konnte somit direkt durch diese Parameterstudie auf die Kapazität rückgeschlossen werden. Es zeigte sich, dass eine Kapazitätssteigerung durch autonome Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen um bis zu 73% erreicht werden kann (30 km/h – 10%; 50 km/h – 22%; 80 km/h – 73%). Dies wird durch geringere Folgeabstände und durch die Reduktion der Geschwindigkeitsoszillationen während eines Folgevorganges ermöglicht.

Bei den Strecken mit der Einmündung konnte keine konstante Kapazität ermittelt werden, vielmehr ist diese abhängig von der Verkehrsstärke der Zuflüsse. Die Zuflüsse wurden bei einem gerade noch stabilen Verkehrsfluss variiert und die so gemessenen Verkehrsstärken konnten mithilfe von Polynomfunktionen 3. und 4. Grades verbunden werden. Diese Kurven stellen die Kapazitätsgrenzen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten dar. Dabei zeigte sich ebenso eine mögliche Leistungsfähigkeitssteigerung im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen um bis zu 73%, welche jedoch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten kaum variieren. Die Kapazität wurde aufgrund dieser Erkenntnisse in Abhängigkeit vom Verhältnis Haupt- zu Nebenstrom und Geschwindigkeit dargestellt. Außerdem auffällig war, dass die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei konventionellen Fahrzeugen stark von jenen der Wunschgeschwindigkeiten abweichen. Im Bereich der autonomen Fahrzeuge sind diese Geschwindigkeiten annähernd gleich. Dies führt bei konventionellen Fahrzeugen nicht nur zu einer geringeren Verkehrsstärke, sondern auch zu höheren Reisezeiten aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten.

Der zweite Teil der Leistungsfähigkeitsanalyse wird an einem Gesamtnetz durchgeführt. Dies ist einem Teil des Straßennetzes von Singapur angepasst. Dieses Netz besteht aus drei unterschiedlichen Streckentypen. Das primäre Streckennetz soll ein schnelles Reisen ermöglichen und kann so mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h von autonomen Fahrzeugen sowie Podcars befahren werden. Diese Strecke soll sich baulich auf einer Höhe von 5,5 Metern befinden. Aufgrund des übergeordneten

Ranges verlaufen die primären Strecken nur Außen herum (Länge x Breite circa 8 m x 8 m) und queren das gesamte Netz bei etwa einem Drittel bis einem Viertel der gesamten Netzbreite. Diese primären Strecken können in beide Richtungen befahren werden, sind jedoch baulich voneinander getrennt und besitzen jeweils nur einen Fahrstreifen pro Richtung. Das sekundäre Netz wurde als Einbahnsystem ausgebildet, kann ebenso von Podcars wie von autonomen Fahrzeugen befahren werden und befindet sich ebenfalls auf einer Höhe von 5,5 Metern. In Abständen von 500 bis 600 Metern gibt es für die Zufahrt des ÖVs (Podcars) Haltestellen. Autonome Fahrzeuge können – im Gegensatz zu Podcars – auch in das tertiäre Netz einfahren, um den Haustür zu Haustür Verkehr zu ermöglichen. Das tertiäre Netz stellt das bestehende Straßennetz dar und liegt somit auf einer Höhe von 0 Metern.

Nach der Implementierung von Haltestellen, Bezirken, Anbindungen und ÖV-Linien mit deren Routen im makroskopischen Netz, wurden Verkehrsumlegungen mit unterschiedlichen Nachfragen durchgeführt, um in weiterer Folge das Netz, sowie deren IV- und ÖV-Routen und Zuflüsse zu exportieren. Diese wurden anschließend in das mikroskopische Netz importiert und Auswertungen des Gesamtnetzes sowie einzelner Knotenpunkte durchgeführt. Die Untersuchungen am Gesamtnetz zeigen durch die Verwendung von autonomen Fahrzeugen eine um bis zu 39% höhere Verkehrsstärke bei flüssigem Verkehrsfluss sowie höhere Reisegeschwindigkeiten. Bei einzelnen Knotenpunkten aus diesem Gesamtnetz ist eine Steigerung der Verkehrsstärke um bis zu 50% möglich.

8.2 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine erhebliche Leistungsfähigkeitssteigerung aufgrund der Automatisierung von Fahrzeugen möglich ist. Die angewendeten Programme VISUM und VISSIM sind vor allem ausgelegt für das Modellieren des Fahrverhaltens von konventionellen Fahrzeugen und deren Fahrzeugkern. Es war deshalb nicht möglich ein Verhalten abzubilden, welches das menschliche Fahrverhalten komplett ausschaltet. Aufgrund dieser Tatsache wäre es zu empfehlen, zusätzliche Programmpakete für die bereits angewendeten Verkehrsmodellprogramme zu entwickeln und somit ein rein autonomes Fahrverhalten darzustellen, in dem die Fahrzeuge über weitere Bereiche miteinander kommunizieren können und bei welchem auch die Kommunikation mit der Infrastruktur möglich ist.

Mithilfe weiterer Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Haltestellen, deren Positionen im Netz und Abstände zueinander, sowie die genaue Ausführung der Buchten könnten weitere Kapazitätssteigerungen durch autonome Fahrzeuge erreicht werden. Außerdem zu untersuchen ist die Struktur des Gesamtnetzes mit deren Streckenanordnungen und Längen.

Außerdem wird noch Potential in der Auslastung der Infrastruktur durch intelligente Routensuche der Podcars gesehen, denn diese wurden in dieser Arbeit mit vorgefertigten ÖV-Linien dargestellt.

Da diese Arbeit allein die Betrachtung autonomer Fahrzeuge durch Simulationen darstellt, wäre zusätzlich eine reale Nachstellung der Teilnetze interessant.

Literaturverzeichnis

Akcelik, R. (2000): Travel time functions of transport planning purposes; Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function; Australien Road Research 21 (3)

Alessandrini, A.; Campagna, A.; Delle Site, P.; Filippi, F.; Persia, L. (2013): Automated vehicles and the rethinking of mobility and cities; SIDT Scientific Seminar 2013; Centre of Transport and Logistics; Sapienza University of Rome

Brilon, W. (2004): Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen; Deutscher Straßen- und Verkehrskongress; Berlin

Brilon, W.; Zurlinden, H. (2003): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 870; Bonn

Choromanski, W.; Daszczuk, W.; Grabski, W.; Dyduch J.; Maciejewski M.; Brach P. (2013): PRT (Personal Rapid Transit) computer network simulation and analysis of flow capacity; Automated People Movers and Transit Systems 2013; American Society of Civil Engineers; Phoenix, Arizona

Davidson, K.B. (1966): A flow-travel time relationship for use in transportation planning; Proceedings of 3rd ARRB Conference 3 (1)

Fellendorf, M. (2013): Verkehrsplanung; Skriptum zur Vorlesung 209.471 für Masterstudium Verkehr und Umwelt, Bauingenieurwissenschaften; Technische Universität Graz; Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Fellendorf, M. (2013): Verkehrsplanung; Folien zur Vorlesung 209.471 für Masterstudium Verkehr und Umwelt, Bauingenieurwissenschaften; Technische Universität Graz; Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Gasser, T. (2012): Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung; Bundesanstalt für Straßenwesen; Bergisch Gladbach

Geistefeldt, J. (2007): Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen; Dissertation; Lehrstuhl für Verkehrswesen; Fakultät für Bauingenieurwesen; Ruhr-Universität Bochum

Juster, R., Schonfeld, P. (2014): An Assessment of Trip Times in Automated Guideway Transit Systems; Submitted for presentation at the 2014 TRB and for publication in the Transportation Research Record

Leutzbach, W. (1972): Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York

Lorenz, M.; Elefteriadou, L. (2000): A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown; Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity; Transportation Research Board; Washington D.C.

Mensebach, W. (2004): Straßenverkehrsplanung, Straßenverkehrstechnik; 4. Auflage; Werner Verlag; München/Unterschleißheim

Mühlich, N.; Gayah, V.; Menendez; M. (2014): An Examination of MFD Hysteresis Patterns for Hierarchical Urban Street Networks Using Micro-Simulation; SVT Working Paper, 76; Zürich IVT, ETH Zürich

Neuhold, R.; Fellendorf, M. (2014): Volume-delay functions based on stochastic capacity; Transportation Research Board; Paper 14-3737, Session 841; 93rd TRB Annual Meeting; Washington

Ponzlet, M. (1996): Dynamik der Leistungsfähigkeiten von Autobahnen – Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen; Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum; Heft 16

PTV Vissim Handbuch (2014): PTV AG; Karlsruhe

PTV Visum Handbuch (2014): PTV AG; Karlsruhe

Raney, S.; Young, S. (2004): Morgantown People Mover, TRB 2005 Reviewing Committee: Circulation and Driverless Transit, Paper

Schnabel, W. (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1: Straßenverkehrstechnik, 3.Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin/Wien/Zürich, Kirschbaumer Verlag GmbH, Bonn

Spieß, H. (1990): Conical volume-delay functions; Transportation Science; Vol 24 (2): 153-158

Wiedemann, R.; Brioln, W.; Brannolte, U. (1977): Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen, Vorläufiger Bericht Nr. 21; Institut für Verkehrswesen Universität Karlsruhe

Van Aerde, M.; Rakha, H. (1995): Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships; Proceedings of the 6th 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference; S. 334-341.

Aus dem Internet:

2getthere (2012): PRT Vehicle Architecture and Control in Masdar City; Utrecht; <http://www.2getthere.eu/wp-content/uploads/PRT-Vehicle-Architecture-and-Control-in-Masdar-City-M.-de-Graaf.pdf>; Zugriff am 22.02.2015

Advanced Transit Association (2013): <http://www.advancedtransit.org/advanced-transit/applications/suncheon/>; Zugriff am 22.02.2015

ATRA (2013): Advanced Transit Association; <http://www.advancedtransit.org/>; Zugriff am 22.02.2015

Futurezone (2015): Selbstfahrender Audi legt 900 Kilometer zur CES zurück; <http://futurezone.at/produkte/selbstfahrender-audi-legt-900-kilometer-zur-ces-zurueck/106.317.093>; Zugriff am 25.02.2015

Geofabrik (2014): OSM-Daten; www.geofabrik.de ; Zugriff am 11.06.2014

Gibbs, S. (2014); Google's self-driving car: How does it work and when can we drive one; The Guardian; <http://www.theguardian.com/technology/2014/may/28/google-self-driving-car-how-does-it-work>; Zugriff am 18.02.2015

Google (2014-1): Google's driverless cars take a ride on city streets; <http://on.rt.com/2nesh7>; Zugriff am 16.02.2015

Google (2014-2); self-driving car project: <https://plus.google.com/+GoogleSelfDrivingCars/posts/9WBWP2E4GDu>; Zugriff am 18.02.2014

Kwon, J. (2015): Britain launches first driverless car – and it's precious; <http://www.popsci.com/britain-launches-first-driverless-car-and-invests-29-million>; Zugriff am 16.02.2015

Meyer, B. (2015-1): Mit Jack durch Kalifornien; <http://blog.audi.de/2015/01/05/mit-jack-durch-kalifornien/>; Zugriff am 19.02.2015

Meyer, B. (2015-2): Welcome to Las Vegas; <http://blog.audi.de/2015/01/06/welcom-to-las-vegas/>; Zugriff am 19.02.2015

NHTSA (2013): Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles; http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf; Zugriff am 14.02.2015

Nosowitz, D. (2011): Driverless car drives 175 miles on busy chinese expressway, no GPS necessary; <http://www.popsci.com/cars/article/2011-08/chinese-driverless-car-travels-over-175-miles-no-gps-required>; Zugriff am 16.02.2015

Posco (2014): Korea's First Personal Rapid Transit (PRT), SkyCube; <http://globalblog.posco.com/koreas-first-personal-rapid-transit-prt-skycube/>; Zugriff am 22.02.2015

PRT Consulting (2009): <http://prtconsulting.com/>; Zugriff am 22.02.2015

Rail Transit (2012): Verfügbar unter: <http://web.presby.edu/~jtbell/transit/>; Zugriff am 19.05.2014

Singapore (2015): About Singapore; <http://app.singapore.sg/about-singapore/sg-facts>; Zugriff am 10.02.2015

Spiegel (2014): Autonomes Fahren: Halbautomatisch rund um Göteborg; <http://www.spiegel.de/fotostrecke/autonomes-fahren-pilotprojekt-drive-me-von-volvo-in-goeteborg-fotostrecke-115075.html>; Juni 2014; Zugriff am 25.02.2015

Ultra Global PRT (2013): <http://www.ultraglobalprt.com>; Zugriff am 02.10.2014

URA (2014): Bezirke von Singapur; <http://www.ura.gov.sg/uol/>; Zugriff am 08.01.2015

Urmson, C. (2012): The self-driving car logs more miles on new wheels; <http://googleblog.blogspot.co.at/2012/08/the-self-driving-car-logs-more-miles-on.html>; Zugriff am 18.02.2015

Urmson, C. (2014-1): The latest chapter of the self-driving car: mastering city street driving; <http://googleblog.blogspot.co.at/2014/04/the-latest-chapter-for-self-driving-car.html>; Zugriff am 18.02.2015

Urmson, C. (2014-2): Just press go: designing a self-driving vehicle; <http://googleblog.blogspot.co.at/2014/05/just-press-go-designing-self-driving.html>; Zugriff am 18.02.2015

Vectus (2012): Suncheon Bay Projekt, South Korea; <http://www.vectusprt.com/EN/first-project/>; Zugriff am 22.02.2015

Volvo Car Group (2014): Volvo Car Group's first self-driving Autopilot cars test on public roads around Gothenburg; <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/145619/volvo-car-groups-first-self-driving-autopilot-cars-test-on-public-roads-around-gothenburg>; Zugriff am 19.02.2015

Regelwerke:

HBS (2001); Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen; FGSV Verlag GmbH; Köln

RVS 03.01.11 (2012); Beurteilung des Verkehrsablaufs auf Straßen, BmVIT, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr; Wien

Anhang

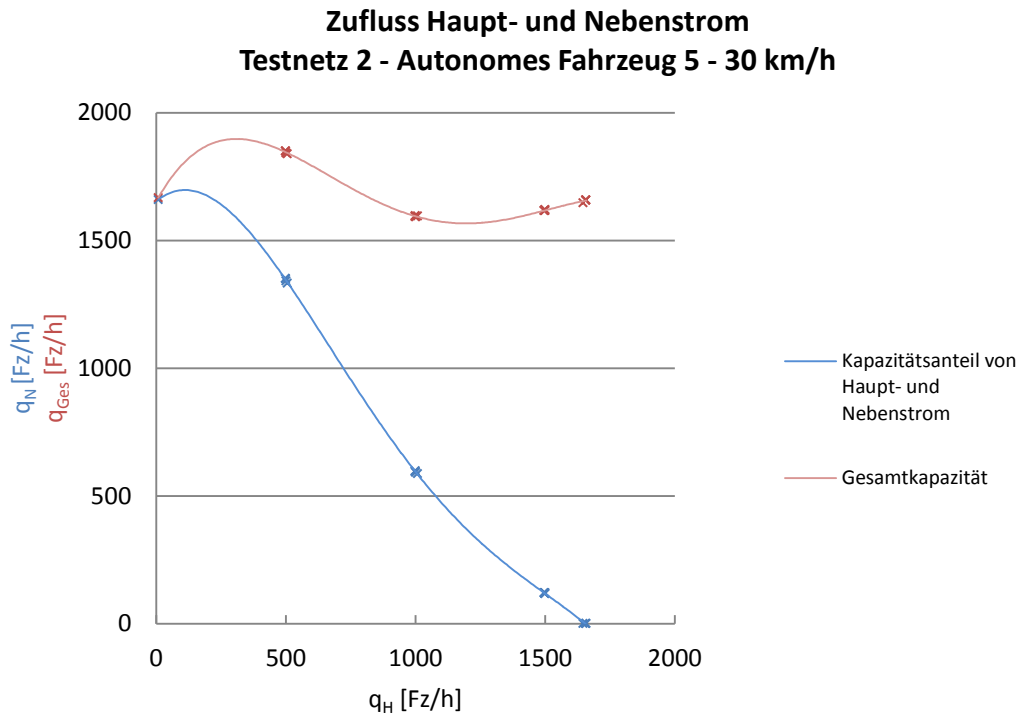


Abbildung 78: Teilnetz 2 – aut5 \triangleq pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h

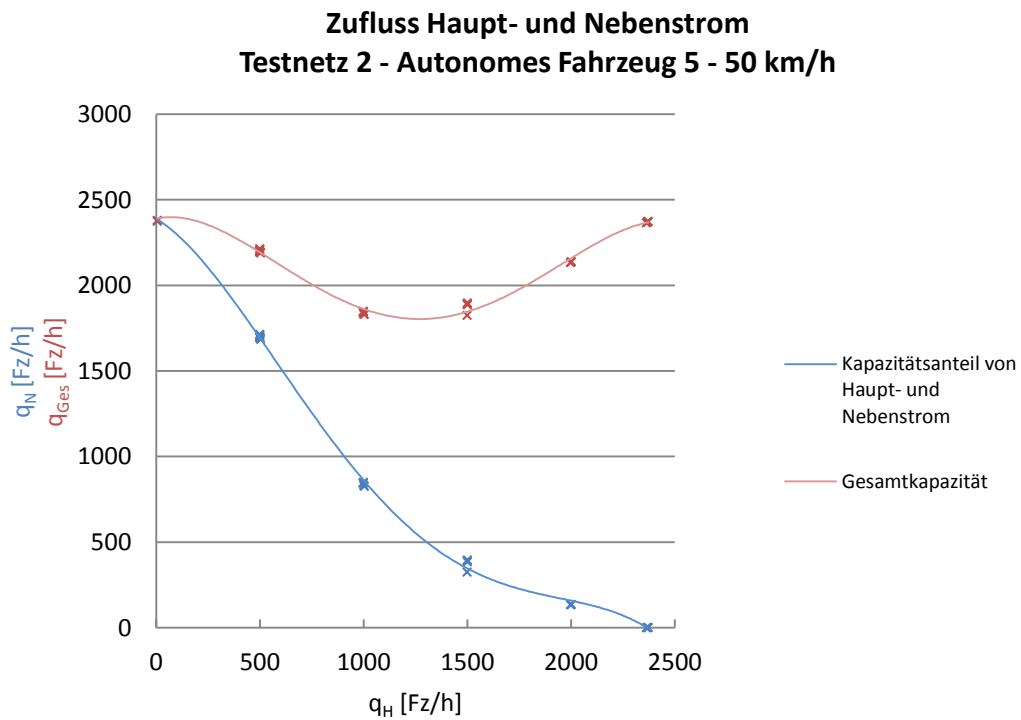


Abbildung 79: Teilnetz 2 – aut5 \triangleq pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h

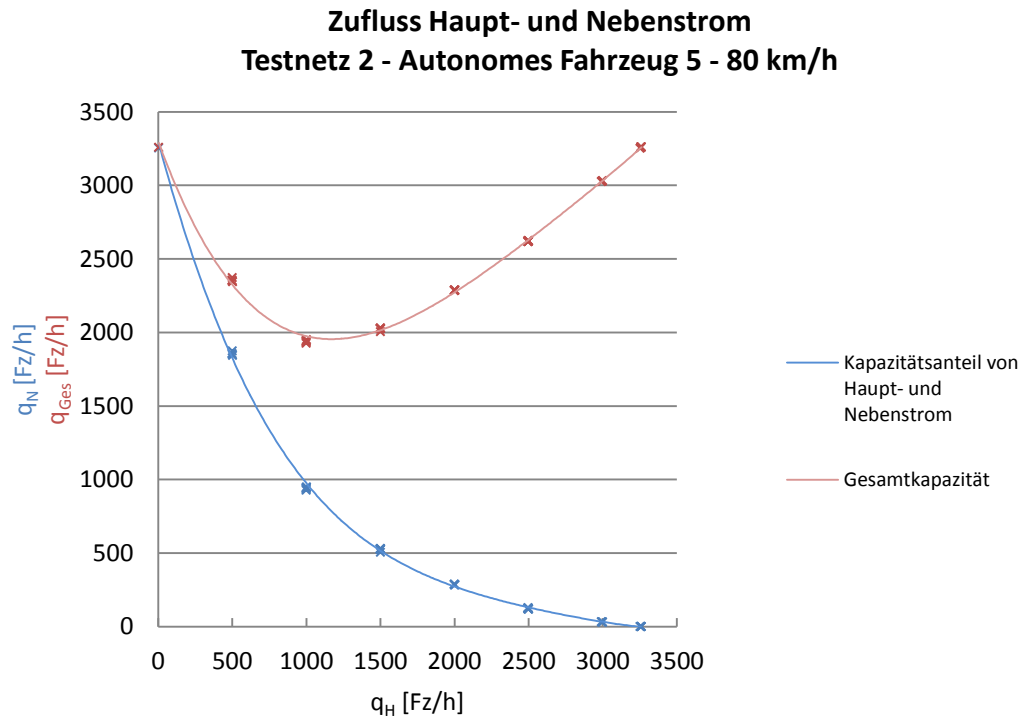


Abbildung 80: Teilnetz 2 – aut5 \cong pod3 – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h

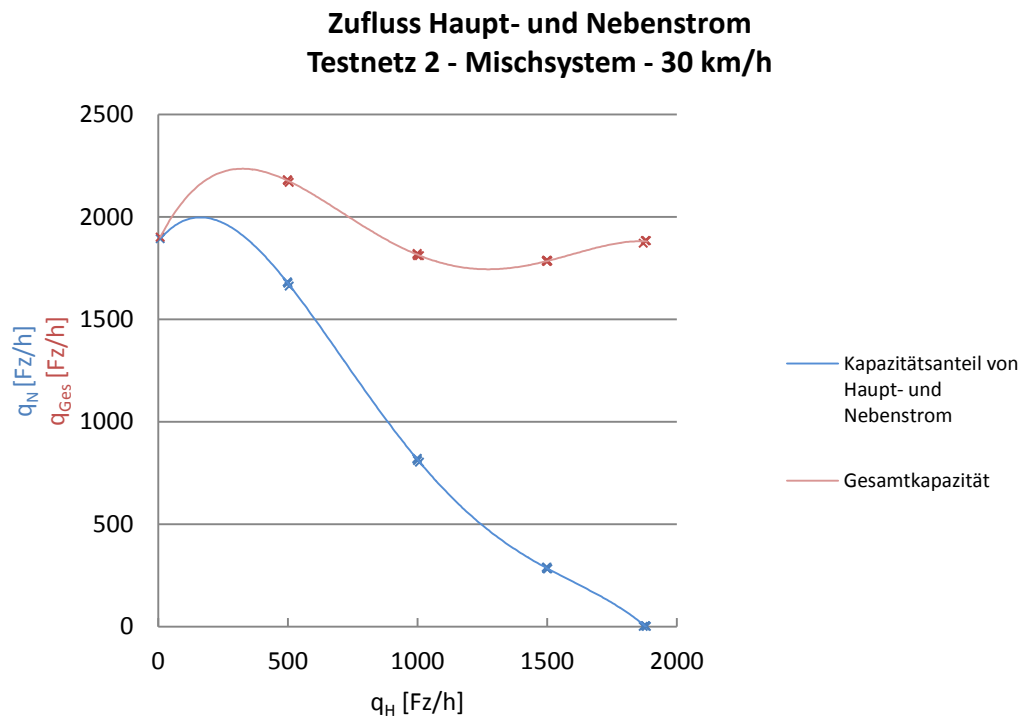


Abbildung 81: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 30$ km/h

**Zufluss Haupt- und Nebenstrom
Testnetz 2 - Mischsystem - 50 km/h**

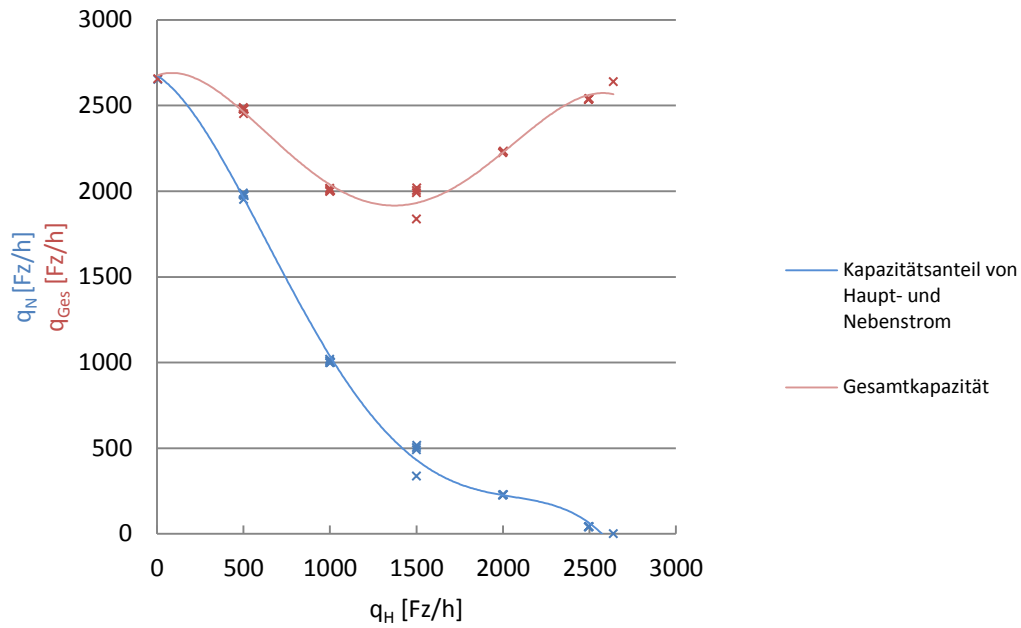


Abbildung 82: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 50$ km/h

**Zufluss Haupt- und Nebenstrom
Testnetz 2 - Mischsystem - 80 km/h**

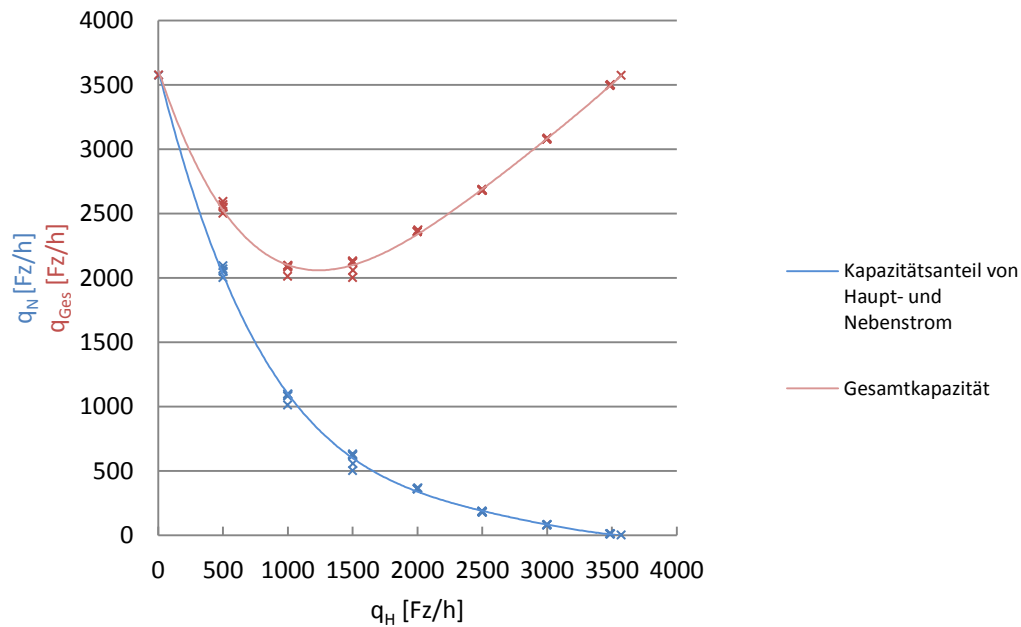


Abbildung 83: Teilnetz 2 – misch – Geschwindigkeit $q_H = q_N = 80$ km/h