

Modellbasierte Evaluation von Verkehrsbeeinflussungskonzepten bezüglich ihrer Schadstoffemissionen

Masterarbeit im Fach

**Dynamische Modellierung und Steuerung von
Verkehrssystemen**

Jonathan Rhode

Matrikelnummer: 363128

Berlin, 18.06.2020

Gutachter:

Dr. Peter Wagner

M.sc. Theresa Thunig

Technische Universität Berlin

Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme

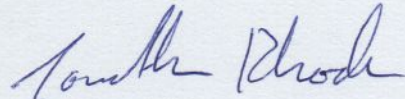
Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet für Dynamische Modellierung

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 18.6.2020
Ort, Datum


Unterschrift

Kurzfassung

Aufgrund der Überschreitung von Grenzwerten für Luftschadstoffe in Städten, werden verschiedene Maßnahmen angewandt um diese Belastung zu reduzieren. Diese zielen zum Teil auf das Verkehrsverhalten ab. Maßnahmen dazu sind zum Beispiel Fahrverbote, Verkehrsflussverstetigungen und Einschränkungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die Auswirkungen von Verkehrsflussverstetigung und Geschwindigkeitsreduktion im Kraftfahrzeugverkehr wurden in 14 verschiedenen Szenarien betrachtet. Insbesondere lag der Fokus auf der Entwicklung der Feinstaub- und Stickstoffoxidemissionen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen auf, dass eine Geschwindigkeitsreduktion zur Reduktion der Schadstoffimmissionen führen kann. Es wurden Reduktionen bei den Feinstaubemissionen um 6,7 % und bei den Stickstoffoxidemissionen um 37 % festgestellt. Ein ähnlicher Effekt ist auch durch eine Verkehrsflussverstetigung zu erwarten, wurde aber nicht explizit betrachtet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Rahmenbedingungen	2
2.1.1 Stickstoffoxide	3
2.1.2 Feinstaub	4
2.2 Maßnahmen zur Immissionsreduzierung	5
2.3 SUMO	8
3 Maßnahmen	10
3.1 Geschwindigkeitsreduktion	11
3.2 Verkehrsflussverstetigung	13
3.3 Fahrverbot	13
4 Berlin	15
5 Methodik	19
5.1 Verkehrsraumgestaltung	19
5.2 Signalzeitenpläne	22
5.3 Verkehrsmodellierung	22
5.4 Szenarien	27
6 Auswertung	29
6.1 speedFactor	29
6.1.1 Geschwindigkeit	29
6.1.2 Wartezeit	34
6.1.3 Feinstaubemissionen	38

Inhaltsverzeichnis

6.1.4	Stickstoffoxidemissionen	40
6.2	Verkehrsabhängige Steuerung	42
6.2.1	Geschwindigkeit	43
6.2.2	Wartezeit	46
6.2.3	Feinstaubemissionen	49
6.2.4	Stickstoffoxidemissionen	50
6.3	Signalzeitenpläne	52
6.3.1	Geschwindigkeit	52
6.3.2	Wartezeit	56
6.3.3	Feinstaubemissionen	59
6.3.4	Stickstoffoxidemissionen	61
6.4	Koordinierung	63
7	Zusammenfassung und Ausblick	67
	Literaturverzeichnis	I
	Anhang	VI
A	Kalibrierung	VII
B	Gesamtübersicht	VIII
C	Verkehrsmodell	X

Abbildungsverzeichnis

4.1	Anteile der Quellgruppen an den Feinstaubemissionen in Berlin 2015 . . .	16
4.2	Anteile einzelner Quellgruppen an der Stickstoffoxidemission in Berlin 2015	17
5.1	Ist-Verkehrsbelastung von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr	23
5.2	Angepasste Verkehrsbelastung von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr	24
5.3	Differenz der Verkehrsbelastungen von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr	25
5.4	Tagesganglinie zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr	26
6.1	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	30
6.2	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	31
6.3	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	32
6.4	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	33
6.5	Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	34
6.6	Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	35
6.7	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	36
6.8	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	38
6.9	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	39
6.10	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	40
6.11	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	41
6.12	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)	42
6.13	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	43

Abbildungsverzeichnis

6.14	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	44
6.15	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	45
6.16	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	45
6.17	Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	46
6.18	Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	47
6.19	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	48
6.20	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	48
6.21	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	49
6.22	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	50
6.23	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	51
6.24	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)	52
6.25	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	53
6.26	Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	54
6.27	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	55
6.28	Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	55
6.29	Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	56
6.30	Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	57
6.31	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	58
6.32	Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	58
6.33	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	59
6.34	Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	60

Abbildungsverzeichnis

6.35	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	61
6.36	Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)	62
6.37	Koordinierungsmaß, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.2 und 3.3)	65
6.38	Koordinierungsmaß, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.2 und 3.3)	66
7.1	Gesamtstickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5	67
7.2	Gesamtfeinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5	68
7.3	Gesamtwartezeit zwischen KP1 und KP5	68

Tabellenverzeichnis

2.1	Stickstoffdioxidgrenzwerte	4
5.1	Knotenpunkte im Untersuchungsraum	19
5.2	Verwendete Signalzeitenpläne	22
5.3	Planfälle	28
6.1	Unterschiede der durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf verschiedenen Auswertungsstrecken	32
6.2	Verkehrsqualität bei koordinierten Lichtsignalanlagen	64
A.1	Korrekturfaktoren	VII
B.1	Übersicht Emissionen	VIII
B.2	Übersicht Wartezeiten	IX

Abkürzungsverzeichnis

HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

Kfz Kraftfahrzeug

Lkw Lastkraftwagen

MIV motorisierter Individualverkehr

Pkw Personenkraftwagen

ÖPNV öffentlicher Personennahverkehr

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welche Auswirkungen Verkehrsbeeinflussungskonzepte auf die Emissionen von Feinstaub und Stickstoffdioxid haben. Die Maßnahmen beschränken sich dabei, sofern nicht anders erwähnt, auf den Verkehr mit Kraftfahrzeugen (Kfz). Aufgrund der gesundheitsschädlichen Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid, werden deren zulässige Emissionswerte – aber auch die Immissionswerte – gesetzlich geregelt. Da es teilweise zu Überschreitungen der Grenzwerte kommt, sind an diesen Orten Maßnahmen zur Reduktion notwendig. Die Arbeit konzentriert sich dabei auf den Verkehrsbereich und bildet ein mögliches Maßnahmenspektrum modellhaft ab.

Im Kapitel 2 werden zuerst die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Emissionen und Immissionen von Schadstoffen sowie deren Entstehen und Wirken aufgezeigt. Außerdem wird ein Überblick über verschiedene Maßnahmen zur Immissionsreduzierung im Verkehrsbereich gegeben. Abschließend wird die verwendete mikroskopische Verkehrssimulation SUMO vorgestellt.

Im Kapitel 3 wird ein Überblick über die drei Maßnahmen gegeben, welche näher untersucht wurden. Diese sind die Geschwindigkeitsreduktion, die Verkehrsflussverstetigung und das Fahrverbot. Dabei werden Ergebnisse unterschiedlicher Untersuchungen dargestellt. Anschließend wird die Situation in Berlin erläutert. Dabei wird unter anderem auf die gesamtstädtische Situation und auf die spezielle Situation in der Leipziger Straße eingegangen. Siehe dazu Kapitel 4. Im Kapitel 5 werden die Überführung ins Modell, notwendige Anpassungen an diesem sowie die Szenarien erläutert.

In Kapitel 6 werden die Auswirkungen der Szenarien analysiert und eingeordnet. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die unterschiedlichen Geschwindigkeiten gelegt. Im abschließenden Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird zum einen ein Überblick über wichtige Schadstoffe im Straßenverkehr gegeben, als auch verschiedene Strategien zur Reduzierung dieser dargestellt. Die Luftverschmutzung und deren Reduzierung ist ein wichtiges Thema, da geschätzt wird, dass jedes Jahr weltweit bis zu 4,2 Millionen Todesfälle auf die Luftverschmutzung zurückzuführen sind.¹

Aktuell werden in einigen deutschen Städten unterschiedliche Maßnahmen erprobt, mit Hilfe deren die Feinstaubbelastung unter den erlaubten Grenzwert gesenkt werden sollen. In Berlin wurde auf einem Abschnitt der Leipziger Straße die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h begrenzt.² In Hamburg wird versucht die Belastung zu senken, indem zwei Straßenabschnitte mit Durchfahrtsbeschränkungen für ältere Dieselfahrzeuge versehen wurden.³ In Stuttgart hat man zum Jahresbeginn 2019 die bestehende Umweltzone um ein Fahrverbot für geringere Emissionsklassen als Euro 5/V erweitert. Dieses Verbot wurde ein Jahr später noch ausgeweitet. Einige Streckenabschnitte wurden mit der Erweiterung auch weitestgehend für die Emissionsklasse Euro 5/V gesperrt.⁴ Im Folgenden wird deshalb näher auf diese bestehenden Maßnahmen und deren Ergebnisse eingegangen, weitere Maßnahmen vorgestellt sowie der gesetzliche Rahmen abgesteckt.

2.1 Rahmenbedingungen

Im Folgenden erfolgt die Darstellung der Entstehungs- und Wirkungsweise von Stickstoffoxiden und Feinstaub sowie von Feinstaub. Außerdem wird der gesetzliche Rahmen für die Immission dieser Schadstoffe erläutert.

¹ vgl. Landrigan et al. 2018, S. 473.

² vgl. Kraetzer 2018, o. S.

³ vgl. Behörde für Umwelt und Energie Hamburg 2020, o. S.

⁴ vgl. Landeshauptstadt Stuttgart 2020, o. S.

2.1.1 Stickstoffoxide

Bei Stickstoffoxiden (NO_x) handelt es sich um die Bezeichnung für gasförmige Stickstoffoxide. Diese verbleiben bis zu zwei Tage in der Atmosphäre.⁵ Die Stickstoffoxide entstehen zumeist bei Verbrennungsvorgängen, zum Beispiel bei Feuerungsanlagen oder Verbrennungsmotoren.⁶

Zu den Stickstoffoxiden gehört auch Stickstoffdioxid (NO_2). Dieses ist ein Reizgas, welches die Atemwege reizt und zu Entzündungen und Schädigungen von Organen führen kann. Es weist die größten negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit auf.⁷ Wenn Menschen einer erhöhten Belastung durch Stickstoffdioxid ausgesetzt sind, steigt das Mortalitätsrisiko dadurch an.⁸ Neben der direkten Auswirkung auf die Gesundheit, wirkt Stickstoffdioxid auch indirekt gesundheitsschädigend in Form von Feinstaub und Ozon, für deren Bildung es notwendig ist. Auf die Auswirkungen von Feinstaub wird im folgenden Abschnitt 2.1.2 eingegangen. Ozon zählt ebenfalls zu den Reizgasen und kann die Lunge schädigen. Aufgrund seiner einfachen Messbarkeit, wird Stickstoffdioxid häufig als Indikator für die Belastung mit Luftschadstoffen allgemein verwendet.⁹

Die Grenzwerte für die Immission wurden durch das Europäische Parlament und den Europäischen Rat vorgegeben und in die „Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen“ übernommen.¹⁰ Diese legt für Stickstoffdioxid vier Grenzwerte fest. Die maximale Belastung innerhalb einer vollen Stunde liegt bei $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dieser Wert darf 18 Mal im Kalenderjahr überschritten werden. Wenn in drei aufeinanderfolgenden Stunden eine Belastung von $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten wird, ist die Alarmschwelle überschritten. Für die mittlere jährliche Belastung gibt es zwei Werte. Der Grenzwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit liegt bei $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und zum Schutz der Vegetation bei $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Stickstoffdioxid.¹¹ Wenn die Alarmgrenze für die Stickstoffdioxidkonzentration überschritten wurde, müssen sofort Maßnahmen zur Reduzierung der Konzentration unternommen werden.¹² Die genannten Grenzwerte gelten für die Außenluft. Für Arbeitsplätze und Innenräume gelten davon abweichende Grenzwerte, siehe dazu Tabelle 2.1.¹³

⁵ vgl. Deutscher Wetterdienst 2020, o. S.

⁶ vgl. Umweltbundesamt 2019, S. 2.

⁷ vgl. ebd., S. 2.

⁸ vgl. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen 2005, S. 77.

⁹ vgl. Umweltbundesamt 2019, S. 3.

¹⁰ vgl. ebd., S. 4.

¹¹ vgl. § 3 Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGB I. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 (BGB I. I S. 1222) geändert worden ist.

¹² vgl. Umweltbundesamt 2019, S. 6.

¹³ vgl. ebd., S. 5.

¹⁴ ebd., S. 5

2 Grundlagen

Tabelle 2.1: Stickstoffdioxidgrenzwerte¹⁴

	EU-Außenluft-grenzwerte	Arbeitsplatz-grenzwerte	Innenraumrichtwerte
Langzeitwerte	Immissionsgrenzwert $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Jahresmittel	–	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Jahresmittel
Kurzzeitwerte	Immissionsgrenzwert $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Einstundenmittel Alarmschwelle $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 3 Einstundenmittel	– –	Kurzzeitrichtwert I $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Vorsorgewert Einstundenmessung Kurzzeitrichtwert II Gefahrenwert $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Einstundenmessung
Arbeitsschicht	–	$950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Schichtmittel	–
Schützt:	Gesamtbevölkerung	Arbeitnehmende an speziellen Arbeitsplätzen	Gesamtbevölkerung

2.1.2 Feinstaub

Bei Feinstaub (*engl. Particulate Matter*) handelt es sich um Teilchen mit einer Größe zwischen Nano- und Mikrometern, welche – bedingt durch ihre Eigenschaften – eine Zeit lang in der Atmosphäre verbringen bevor sie zu Boden sinken.¹⁵

Der Feinstaub wird dabei in primäre und sekundäre Feinstäube unterteilt. Primäre Feinstäube werden direkt an der Quelle emittiert und sekundäre Feinstäube entstehen durch chemische Vorgänge außerhalb der Quelle. Bei den Quellen wird zwischen natürlichen und anthropogenen Quellen differenziert. Zu den anthropogenen Quellen gehört auch der Verkehr. Im Verkehr entsteht Feinstaub durch den Abrieb von Reifen und Bremsen sowie durch die Motoren.¹⁶ Eine weitere wichtige Quelle für Feinstaubemissionen ist die Aufwirbelung von auf der Fahrbahn abgelagertem Feinstaub.¹⁷

Aufgrund dessen, dass der Feinstaub negative gesundheitliche Auswirkungen hat, besteht die Notwendigkeit, die Belastung möglichst gering zu halten. Die gesundheitlichen Schädigungen entstehen dadurch, dass die Partikel aufgrund ihrer geringen Größe in die Atemwege gelangen und dort zu Entzündungen führen können.¹⁸ Diese Effekte können schon nach kurzzeitiger erhöhter Belastung registriert werden und schlagen sich in Blutdruck-

¹⁵ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 3f.

¹⁶ vgl. ebd., S. 4.

¹⁷ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 2.

¹⁸ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 4f.

veränderungen und Infektionen nieder.¹⁹ Die negativen Auswirkungen der Partikel nehmen mit abnehmender Partikelgröße zu, denn: Je kleiner die Partikel sind, desto besser können sie vom Organismus aufgenommen werden.²⁰ Es wurde außerdem festgestellt, dass es keine Untergrenze der Belastung für negative Auswirkungen gibt und schon geringe Konzentrationen langfristige Schäden verursachen können.²¹

Die lokale Immission von Feinstaubpartikeln in Ballungsräumen, dass heißt mit einer Größe von weniger als $10\mu\text{m}$, setzt sich dabei aus drei Bereichen zusammen: Erstens, der lokalen Hintergrundbelastung, bei der die Partikel über weite Strecken transportiert werden bzw. diese bei sekundärem Feinstaub erst während des Transportes entstehen. Zweitens, der städtischen Hintergrundbelastung durch, zum Beispiel die Emission von Verkehr und Industrie. Als dritter Punkt sind die lokalen Spitzen zu nennen, welche zum Beispiel an stark befahrenen Straßen entstehen. Ziel von Verkehrseinschränkungen ist dabei meist die Reduktion der lokalen Spitzen.²² Hierbei ist zu beachten, dass die Feinstaubemissionen von Dieselmotoren wesentlich höher sind, als die von Benzinmotoren.²³

Die Grenzwerte für die Immission wurden durch das Europäische Parlament und den Europäischen Rat vorgegeben und in die „Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen“ übernommen.²⁴ Diese legt für Feinstaub einen langfristigen und einen kurzzeitigen Immissionsgrenzwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit fest. Der kurzzeitige Grenzwert bezieht sich auf die mittlere Immissionsbelastung an einem Tag und liegt bei $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser darf allerdings an bis zu 35 Tagen im Kalenderjahr überschritten werden. Der langfristige Grenzwert bezieht sich auf die mittlere Immission innerhalb eines Kalenderjahres und liegt bei $40\mu\text{g}/\text{m}^3$. Für Partikel kleiner als $2,5\mu\text{m}$ gilt seit 2015 ein strenger Langzeitgrenzwert von $25\mu\text{g}/\text{m}^3$.²⁵

2.2 Maßnahmen zur Immissionsreduzierung

Die Minderung der Immissionen kann dabei aus zwei unterschiedlichen Richtungen erfolgen: zum einen durch Reduktion der Emission mit Hilfe von Verfahren zur Senkung der Schadstoffabgabe, zum Beispiel der Abgasreinigung. Zum anderen durch eine Reduzierung von emittierenden Prozessen, zum Beispiel durch Fahrverbote. Lokale Behörden

¹⁹ vgl. Gerlofs-Nijl, Cassee und Salonen 2012, S. 41f.

²⁰ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 17f.

²¹ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 5.

²² vgl. ebd., S. 7f.

²³ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 2.

²⁴ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 5.

²⁵ vgl. § 4 und § 5 Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 (BGBl. I S. 1222) geändert worden ist.

können dabei rechtlich oft nur auf die Verminderung der emittierenden Prozesse hinwirken, da diese Maßnahmen meist durch Europa- bzw. Bundesrecht geregelt sind.²⁶

Die Reduzierung der Feinstaubbelastung kann durch gezielte Maßnahmen bei allen Emittenten erzielt werden. In dieser Arbeit werden allerdings nur die Emissionen des Verkehrs betrachtet, somit beschränken sich die dargestellten Maßnahmen auch ausschließlich auf Instrumente im Verkehrsbereich. Die daraus resultierenden Maßnahmen für den Verkehr können in zwei Kategorien eingeteilt werden: technische und nichttechnische Maßnahmen.

Technische Maßnahmen

Die Entwicklung und Umsetzung von technischen Maßnahmen erfolgt meist aufgrund von gesetzlichen Einschränkungen und wirkt sich häufig direkt auf das Fahrzeug aus. Zu nennen sind unter anderem:²⁷

- die Förderung der Beschaffung emissionsarmer Lastkraftwagen (Lkw)
- die Berücksichtigung der Schadstoffemissionen bei der Lkw-Maut
- die Förderung der Nachrüstung von Partikelfiltern
- die Festlegung von Abgasgrenzwerten

Nichttechnische Maßnahmen

Die nichttechnischen Maßnahmen setzen dagegen bei der Verkehrsplanung und dem Verkehrsmanagement an. Diese Maßnahmen weisen dabei drei unterschiedliche Ziele auf:²⁸

- Verkehrsvermeidung
- Verkehrsverlagerung
- verträgliche Verkehrsabwicklung

Die Auswirkungen der Zielerreichungen nehmen dabei in der genannten Reihenfolge ab. Jede einzelne Maßnahme sollte dabei einen positiven Einfluss auf die Umweltqualität aufweisen und hinsichtlich ihrer Wirkung und Kosten effizient sein.²⁹

²⁶ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 9f.

²⁷ vgl. ebd., S. 10f.

²⁸ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, S. 8.

²⁹ vgl. ebd., S. 8.

2 Grundlagen

Verkehr wird vermieden, indem Fahrten reduziert werden. Aus diesem Grund wirken Maßnahmen mit diesem Ziel am effektivsten bei der Verringerung des Schadstoffausstoßes. Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung können Folgende sein: Bildung von Fahrgemeinschaften³⁰ bzw. Car-Pooling,³¹ Fahrverbote,³² Straßennutzungsgebühren,³³ Nutzung regionaler Produkte und die Stadt der kurzen Wege.³⁴

Mit der Schaffung von Umweltzonen,³⁵ der Organisation der Parkraumnutzung, verbessertem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sowie Fahrradabstellanlagen können sowohl räumliche als auch intermodale Verkehrsverlagerungen hin zum Umweltverbund erzielt werden.³⁶ Auch Fahrverbote und Straßennutzungsgebühren können neben der Verkehrsvermeidung zu einer Verlagerung führen. Durch eine modale Verlagerung können Emissionen vermindert werden, während bei einer räumlichen und auch zeitlichen Verlagerung nur eine Umverteilung stattfindet.³⁷

Um den Verkehr verträglicher zu gestalten, wird zumeist steuernd eingegriffen. Dies kann durch Geschwindigkeitsbeschränkungen geschehen,³⁸ aber auch durch Lichtsignalanlagensteuerung, Wechselwegweisung oder Linienbeeinflussung.³⁹

Wie bereits erwähnt, können intermodale Verlagerungen in Richtung Umweltverbund ebenfalls die Feinstaubbelastung senken. Bei einer Verlagerung hin zum ÖPNV ist allerdings zu beachten, dass die dort verwendeten Fahrzeuge durch technische Maßnahmen möglichst emissionsarm sein sollten, damit eine Reduzierung der Emissionen erreicht werden kann.⁴⁰

Die Maßnahmen können zusätzlich auch nach der Stärke des Eingriffes klassifiziert werden. Dieser unterteilt sich in die vier Stufen: Zwang, Anreiz, Vorschlag und Informationen. Während der Nutzer bei einer zwanghaften Maßnahme, zum Beispiel einem Fahrverbot, zur Änderung seines Verhaltens gezwungen wird, wird in der Stufe Anreiz ein bestimmtes Verhalten finanziell oder zeitlich bevorzugt, zum Beispiel bei einer zeitabhängigen Straßenbenutzungsgebühr. Eine Umleitungsempfehlung ist als Vorschlag zu werten und in der Stufe der Information werden dem Nutzer nur Informationen über einen bestimmten Sachverhalt, zum Beispiel eine Staumeldung, gegeben und dieser ist frei in der Wahl seiner Verhaltensänderung.⁴¹

³⁰ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 12.

³¹ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, S. 25.

³² vgl. ebd., S. 19.

³³ vgl. ebd., S. 25.

³⁴ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 12.

³⁵ vgl. ebd., S. 12.

³⁶ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, S. 19ff.

³⁷ vgl. ebd., S. 25.

³⁸ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 12.

³⁹ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, S. 21f.

⁴⁰ vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 13.

⁴¹ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2002, S. 23.

Diese nichttechnischen Maßnahmen werden in Städten und Ballungsräumen in Luftreinhalte- oder Aktionsplänen zusammengefasst. Diese können prinzipiell alle Bereiche von Emissionen betreffen, beschränken sich allerdings zumeist auf den Verkehr.⁴² Ein Luftreinhalteplan muss dann erstellt werden, wenn die in Kapitel 2.1 genannten Grenzwerte überschritten werden. Ziel des Planes ist es, dass die Immissionen reduziert werden, damit die Grenzwerte eingehalten werden. Wenn diese Maßnahmen nicht zum Erfolg führen, müssen die entsprechenden Pläne fortgeschrieben und um schärfere Auflagen ergänzt werden.⁴³ Derzeit haben 156 Städte in Deutschland entsprechende Pläne und in weiteren fünf Städten sind Luftreinhaltepläne in Arbeit.⁴⁴

2.3 SUMO

Für die Simulation wird die Open-Source-Software SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) verwendet. Mit SUMO kann multimodaler Verkehr mikroskopisch simuliert werden.⁴⁵ Grundsätzlich werden Verkehrsmodelle in vier Gruppen unterschieden:⁴⁶

- Makroskopisch: Durchschnittliche Verkehrseigenschaften, wie Verkehrsdichte, werden simuliert.
- Mikroskopisch: Jedes Fahrzeug wird mit seinen Eigenschaften einzeln simuliert.
- Mesoskopisch: Zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen einzuordnen.
- Submikroskopisch: Jedes Fahrzeug und auch die fahrzeuginternen Vorgänge, wie Gangschaltung, werden simuliert.

Die mikroskopische Simulation in SUMO wird dabei durch verschiedene Modelle definiert. Diese Modelle lassen sich in drei wichtige Modellklassen unterteilen und sind im Folgenden mit ihrer Wirkung beschrieben.⁴⁷

- Fahrzeugfolgemodell (*engl.: Car-following model*): Bestimmt die Geschwindigkeit des Fahrzeuges in Bezug auf das vorausfahrende Fahrzeug.
- Kreuzungsmodell (*engl.: Intersection model*): Bestimmt das Verhalten von Fahrzeugen an unterschiedlichen Kreuzungstypen.
- Fahrstreifenwechselmodell (*engl.: Lane-changing model*): Bestimmt die Fahrstreifenwahl bei mehrstreifigen Straßen sowie die Geschwindigkeit beim Fahrstreifenwechsel.

⁴² vgl. Umweltbundesamt 2009, S. 18.

⁴³ vgl. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH 2019, o. S.

⁴⁴ vgl. Umweltbundesamt 2020b, o. S.

⁴⁵ vgl. Erdmann 2014, S. 1.

⁴⁶ vgl. Lopez et al. 2018, S. 2575.

⁴⁷ vgl. Erdmann 2014, S. 1.

Für jede dieser Modellklassen gibt es wiederum unterschiedliche Modelle, welche das Verhalten der Fahrzeuge simulieren.

Zur Verkehrssimulation werden verschiedene Eingangsdaten benötigt. Notwendig sind das Netzwerk und die Verkehrsnachfrage, außerdem werden zusätzliche Informationen über die Verkehrsinfrastruktur benötigt. Die zusätzlichen Informationen zur Verkehrsinfrastruktur enthalten zum Beispiel Informationen über Lichtsignalanlagen oder Bushaltestellen.⁴⁸ Das Straßennetz wird in SUMO über Kanten definiert. Eine Kante verläuft dabei zwischen genau zwei Knoten – zumeist Kreuzungen – und weist eine konstante Höchstgeschwindigkeit sowie Anzahl an Fahrstreifen auf. Auf einer Kante sind die Fahrzeuge dabei frei in ihrer Fahrstreifenwahl, sofern die Nutzung eines Fahrstreifens nicht eingeschränkt ist, wie zum Beispiel Bussonderfahrstreifen oder Radfahrstreifen.⁴⁹

Die Verkehrsnachfrage kann auf drei Arten in SUMO implementiert werden. Entweder als einzelne Fahrt, als Verkehrsfluss oder als Route. Bei allen drei Varianten ist es notwendig die Abfahrtszeit und das Transportmittel zu definieren. Bei der einzelnen Fahrt und dem Verkehrsfluss werden zusätzlich der Start- und Zielort angegeben. Zwischen diesen beiden Punkten wird dann eine freie Route gewählt. Im Gegensatz zur einzelnen Fahrt handelt es sich bei dem Verkehrsfluss um mehrere Fahrten, sodass dort die Nachfrage innerhalb eines Intervalls definiert wird. Bei der Route wird für jedes Fahrzeug einzeln die exakte Route auf den Kanten bestimmt, dadurch ist nicht zwingend ein Start- bzw. Zielort notwendig.⁵⁰

Die Fahrzeuge können über verschiedene Parameter konfiguriert werden, welche dann zum Beispiel in einem Fahrzeugfolgemodell berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit relevanten Parameter erläutert. Der Parameter `sigma` beschreibt die Fehleranfälligkeit der Agenten. `length` gibt die Fahrzeuglänge in Metern an und `minGap` den minimalen Abstand zum vorderen Fahrzeug in Metern. Mit `speedFactor` wird beschrieben, um wie viel der Parameter `speedLimit` maximal überschritten wird. `speedLimit` beschreibt die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf einer Kante. Über `tau` wird angegeben, welche minimale Zeitlücke durch die Agenten angestrebt wird. Durch `emissionClass` wird das verwendete Emissionsmodell und durch `vClass` das Fahrzeugmodell festgelegt. Der Parameter `emissionClass` ist wichtig zur Bestimmung der Emissionen und durch `vClass` wird bei Restriktion von Fahrstreifen über die Befahrbarkeit dieser entschieden. Der Parameter `vClass` kann zum Beispiel die Werte Taxi, Bus oder Passenger annehmen.⁵¹

⁴⁸ vgl. Lopez et al. 2018, S. 2575.

⁴⁹ vgl. Erdmann 2014, S. 2.

⁵⁰ vgl. Lopez et al. 2018, S. 2577.

⁵¹ vgl. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) 2020, o. S.

3 Maßnahmen

In diesem Kapitel wird auf die praktische Umsetzung der Maßnahmen in der Realität eingegangen. Die Maßnahmen, welche zur Reduktion theoretisch infrage kommen, wurden bereits in Kapitel 2.2 angesprochen. Da vor allem in Straßenschluchten die Stickstoffdioxidkonzentration wesentlich von der Hintergrundbelastung, dem Wind und dem Anteil an Dieselmotoren abhängt, kann eine Verringerung der Emission durch Dieselmotoren wirksam zur Konzentrationsreduktion beitragen. Diese Reduktion lässt sich schon dadurch erreichen, dass die vorhandenen Grenzwerte für Euro 6/VI Diesel eingehalten werden.⁵² Auch wegen der Nichteinhaltung der Grenzwerte ist es notwendig, dass sich die umgesetzten Maßnahmen an den in der Praxis erreichten Immissionen orientieren.⁵³

Nicht immer sind dabei statische Maßnahmen am sinnvollsten oder notwendig. An einigen Orten sind Verkehrsveränderungen nur bei Spitzenbelastungen erforderlich. Diese angepasste Steuerung wird als umweltsensitives Verkehrsmanagement bezeichnet. Die Maßnahmen sind dabei identisch zu denen des regulären Verkehrsmanagement.⁵⁴ Im Folgenden werden drei Maßnahmen vorgestellt, welche zu einer Reduktion der Schadstoffbelastung beitragen können. Das sind die Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, die Verstetigung des Verkehrsflusses und die Einrichtung von Fahrverboten. Im Bereich des umweltsensitiven Verkehrsmanagements finden sich auch Maßnahmen, wie das nächtliche Abschalten von Lichtsignalanlagen oder wetterabhängige Verkehrssteuerungen, wieder. Auf diese wird in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen.⁵⁵ Mit umweltsensitivem Verkehrsmanagement konnte im Bereich der Stickstoffoxide eine Immissionsminderung bis zu 30 % erreicht werden, beim Feinstaub wurde der Grenzwert an bis zu zehn Tagen weniger überschritten. Die erreichten Reduktionen sind dabei stark von der Art und der Dauer der Maßnahme abhängig.⁵⁶

⁵² vgl. Degraeuwe et al. 2017, S. 336.

⁵³ vgl. Butler, Von Schneidmesser und Becker 2018, S. 7.

⁵⁴ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2014, S. 2.

⁵⁵ vgl. ebd., S. 7.

⁵⁶ vgl. ebd., S. 3.

3.1 Geschwindigkeitsreduktion

Die Auswirkung der Geschwindigkeit auf die Feinstaub- und Stickstoffoxidemissionen wurde in verschiedenen Studien untersucht. Im Folgenden wird eine Studie in Bezug auf die Steigung von Straßen näher dargestellt.

Anlass für die Studie waren die fehlenden Aussagen im Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs zu Emissionen bei Steigungen über 6 %.⁵⁷ In Sachsen weisen diverse Strecken eine höhere Steigung sowie Überschreitungen der Grenzwerte für Stickstoffdioxid auf. Deswegen wurde diese Untersuchung durchgeführt, um die geschwindigkeitsabhängigen Emissionen bei einer Steigung von über 6 % zu bestimmen.⁵⁸ Die Untersuchung wurde dabei an einzelnen Fahrzeugen, welche repräsentativ für eine Fahrzeugklasse sind, durchgeführt. Im Ergebnis wurde nicht für alle Fahrzeugtypen ein Einfluss der Geschwindigkeit auf die Stickstoffdioxidemissionen festgestellt. Die Versuche wurden auf einer Strecke mit einer mittleren Steigung von 7 % durchgeführt. Damit ein Personenkraftwagen (Pkw) dort die Geschwindigkeit von 50 km/h erreicht, ist eine Motorleistung erforderlich, welche das Fahrzeug in der Ebene auf 125 km/h beschleunigen würde. Damit liegt die geforderte Motorleistung über den 120 km/h, welche bei Zertifizierung untersucht werden.⁵⁹ Die Versuche wurden für vier Geschwindigkeitsstufen durchgeführt: 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h und 60 km/h.⁶⁰ Für Benzinmotoren konnten keine Abhängigkeiten festgestellt werden, da die gemessenen Emissionen unterhalb des Messbereiches lagen.⁶¹ Sowohl bei Bus-Dieselmotoren als auch bei einem Dieselmotor mit 3,0 l Hubraum konnten keine Relation zwischen der Geschwindigkeit und der Emission festgestellt werden.⁶² Ein Geschwindigkeitseinfluss konnte dagegen bei einem Dieselmotor mit einem Hubraum von 1,6 l und beim Lkw-Motor festgestellt werden. Beim Pkw-Motor ist bei der Erhöhung der Geschwindigkeit von 50 km/h auf 60 km/h eine Verdoppelung der Emissionen zu verzeichnen. Bei 40 km/h treten allerdings geringfügig geringere Emissionen als bei 30 km/h auf.⁶³ Aufgrund des hohen Gesamtgewichtes von 39 Tonnen,⁶⁴ konnten mit dem Lkw maximal 45 km/h erreicht werden. Deshalb wurde die Messung auch mit 20 km/h durchgeführt. Der Anstieg von 30 km/h auf 40 km/h führt dabei zu einer Veracht-fachung der Emissionen. Wenn die Geschwindigkeit von dort um 5 km/h auf die Volllast gesteigert wird, steigen die Emissionen nochmal um den Faktor 14 an.⁶⁵

⁵⁷ vgl. Hausberger et al. 2017.

⁵⁸ vgl. Dietz et al. 2017, S. 7.

⁵⁹ vgl. ebd., S. 26.

⁶⁰ vgl. ebd., S. 19.

⁶¹ vgl. ebd., S. 22.

⁶² vgl. ebd., S. 23.

⁶³ vgl. ebd., S. 20.

⁶⁴ vgl. ebd., S. 18.

⁶⁵ vgl. ebd., S. 23f.

3 Maßnahmen

Die Autoren der Untersuchung kommen zu dem Schluss, dass aufgrund des großen Einflusses der Abgasbehandlungsanlagen keine Rückschlüsse auf alle Fahrzeuge gezogen werden können. Es wird allerdings festgestellt, dass bei einigen Fahrzeugen höhere Motorlasten auch zu signifikant höheren Stickstoffoxidemissionen führen. Aufgrund der in der Voruntersuchung festgestellten geringen Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit auf dem untersuchten Streckenabschnitt, wird davon ausgegangen, dass eine Kontrolle der maximalen Geschwindigkeit zu einer Reduktion der Emission führt. Außerdem wird zu einer Verstetigung des Verkehrsflusses geraten, damit zusätzliche Emissionen durch Beschleunigungen vermieden werden.⁶⁶

Andere Untersuchungen haben festgestellt, dass die größten Reduktionen des Stickstoffoxidausstoßes durch eine Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit, vor allem bei hohen Längsneigungen oder un stetigen Verkehr, auftreten. Beim Feinstaub sei keine Tendenz zu verzeichnen – der Rückgang der Aufwirbelungen wird durch einen erhöhten Wert in den Abgasen zumeist kompensiert.⁶⁷ Essentiell für die Wirkungen aus einer Geschwindigkeitsreduktion ist die Überwachung der gefahrenen Geschwindigkeiten.⁶⁸ Dies wurde unter anderem in Halle (Saale) festgestellt. Dort lag die Reduzierung der Feinstaubemissionen ohne Geschwindigkeitsüberwachung bei einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h bei unter 10 %. Wenn diese Beschränkung zusätzlich mit einer Radarkontrolle überwacht wurde, lagen die erzielten Einsparungen zwischen 10 % und 20 %.⁶⁹

Der Autor einer anderen Studie, Hartmut Topp, kommt bei seinen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass sich eine Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit auf die Luftqualität nur sehr geringfügig auswirkt, da die positiven Einflüsse, wie geringere Feinstaubaufwirbelungen, durch geringfügig höhere Fahrzeugemissionen ausgeglichen werden. Allgemein sind die konkreten Wirkungen stark ortsabhängig.⁷⁰

Auf andere Verkehrsteilnehmer als den motorisierter Individualverkehr (MIV) hat eine Geschwindigkeitsreduktion nur geringen Einfluss. Auch eine Verdrängung des Verkehrs in andere Gebiete findet aufgrund des dort höheren Verkehrswiderstandes zumeist nicht statt. Durch die geringeren Geschwindigkeiten wird zudem die allgemeine Verkehrssicherheit erhöht.^{71,72}

⁶⁶ vgl. Dietz et al. 2017, S. 26.

⁶⁷ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 3.

⁶⁸ vgl. ebd., S. 4.

⁶⁹ vgl. ebd., S. 7.

⁷⁰ vgl. Topp 2014, S. 28.

⁷¹ vgl. LK Argus GmbH 2013, S.3.

⁷² vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 4.

3.2 Verkehrsflussverstetigung

Eine andere Maßnahme zur Verringerung der Immissionen von Stickstoffoxiden und Feinstaub ist die Verstetigung des Verkehrsflusses, also die Einrichtung von „grünen Wellen“. Diese dienen ursprünglich einem stetigen Verkehrsfluss über mehrere Knotenpunkte hinweg. Um eine Pulkauflösung zu vermeiden, sollte der Knotenpunktabstand nicht größer als 750 m sein. Außerdem sollte der Abstand zwischen den Knotenpunkten möglichst einheitlich sein.⁷³

Diverse Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass eine Verstetigung des Verkehrsflusses einen wesentlich größeren positiven Einfluss auf die Feinstaubemissionen hat, als eine Verminderung der zulässigen Geschwindigkeiten.⁷⁴ Dies liegt an den Aufwirbelungsemissionen. Diese entstehen dadurch, dass auf der Fahrbahn liegender Staub durch die Fahrzeuge aufgewirbelt wird. Besonders stark tritt dieser Effekt bei Beschleunigungsvorgängen auf.⁷⁵ Durch eine Verflüssigung des Verkehrs und damit verminderten Beschleunigungsvorgängen gehen Diegmann et al. davon aus, dass sich eine Reduzierung der mittleren jährlichen Feinstaubimmission zwischen $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreichen lässt.⁷⁶ Auch in Hannover hat sich der positive Effekt der Verstetigung des Verkehrsflusses gezeigt.⁷⁷

3.3 Fahrverbot

Eine weitere Möglichkeit, die Emission von Schadstoffen zu reduzieren, ist besonders starken Emittenten das Befahren von hochbelasteten Strecken oder Gebieten zu verbieten. Die Wirksamkeit hängt dabei stark vom Anteil der Fahrzeuge am Gesamtverkehr ab, für welche die Befahrung verboten wurde.

Eine Studie für das Umweltbundesamt von Diegmann et al. kam im Jahr 2006 zu dem Ergebnis, dass ein Lkw-Fahrverbot bei einem Anteil von 4 % am Gesamtverkehr eine Reduzierung der lokalen Feinstaubemissionen um 33 % bewirken würde. Bei einem höheren Schwerverkehrsanteil von 6 % liegt die mögliche Reduktion bei 41 %. Die tatsächlich erreichten Reduktionen sind dabei stark von der Befolgsrate der Verbote abhängig. Der Jahresmittelwert der Immissionen kann durch die erzielten Emissionsreduktionen um 5 % gesenkt werden.⁷⁸ Diese Reduktion entspricht auch der in Kapitel 4 dargestellten Reduktion in Berlin und kann somit zu einer Reduzierung der Überschreitungstage beitragen.

⁷³ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015b, S. 44.

⁷⁴ vgl. Düring, Lohmeyer und Moldenhauer 2008, S. 226f.

⁷⁵ vgl. Diegmann et al. 2006, S. 11.

⁷⁶ vgl. ebd., S. 11.

⁷⁷ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 4.

⁷⁸ vgl. Diegmann et al. 2006, S. 8.

3 Maßnahmen

Die Autoren der Studie kommen außerdem zu dem Schluss, dass auch eine allgemeine Reduzierung des Verkehrsaufkommens zu einer Reduktion der Feinstaubimmissionen führen kann. Um eine Minderung zwischen 3 % und 4 % zu erreichen, muss das Verkehrsaufkommen allerdings um 20 % bis 30 % reduziert werden.⁷⁹

Bei kleinräumigen Fahrverboten ist aber auch zu berücksichtigen, dass diese nur zu einer räumlichen Verlagerung des Verkehrsaufkommens führen könnten und somit nur die Verteilung der Emission geändert wird.

⁷⁹ vgl. Diegmann et al. 2006, S. 12.

4 Berlin

In diesem Kapitel wird die Situation in Berlin hinsichtlich seiner Konzepte und deren Umsetzung zur Luftreinhaltung dargestellt.

Im Jahr 2019 hat Berlin die zweite Fortschreibung des Luftreinhalteplanes veröffentlicht. Der erste Luftreinhalteplan war im Jahr 2005 erstellt worden und die erste Fortschreibung 2011. Die zweite Fortschreibung ist aufgrund der anhaltenden Überschreitungen der Grenzwerte notwendig geworden und hat eine Gültigkeit bis zum Jahr 2025. Problematisch sind dabei vor allem Stickstoffdioxid sowie Feinstaub bei ungünstigen meteorologischen Verhältnissen.⁸⁰ Der Luftreinhalteplan wird dabei für das gesamte Berliner Stadtgebiet aufgestellt.⁸¹

Da die Messung der Luftqualität nur an einzelnen Stationen erfolgt, wird durch Modellrechnungen die Belastung für das gesamte Stadtgebiet bestimmt. Die Emissionen durch den Straßenverkehr wurden dabei anhand des Handbuchs für Emissionsfaktoren bestimmt. Durch diese Rechnungen wurde ermittelt, dass 2015 bis zu 59.000 Anwohner durch eine erhöhte Stickstoffdioxidbelastung betroffen waren. Die höchste Belastung wurde dabei an der Leipziger Straße zwischen dem Leipziger Platz und der Wilhelmstraße mit $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet, was mehr als doppelt so hoch ist, als der erlaubte Grenzwert.⁸² Die Berechnung der Überschreitungen der Feinstaubbelastung ist aufwendiger, da diese vor allem durch eine zu hohe Anzahl an Verstößen gegen den Kurzzeitgrenzwert entstehen. Um diese Überschreitungen zu bestimmen, müsste die Feinstaubbelastung allerdings stundengenau modelliert werden. Aus diesem Grund wird zur Bestimmung der Anzahl der Überschreitungen des Tagesgrenzwertes der statistische Zusammenhang zwischen diesem Wert und dem Jahresmittelwert verwendet. Für das Jahr 2015 wurde so berechnet, dass bei einer Straßenlänge von 0,5 km eine Überschreitung sehr wahrscheinlich ist und auf weiteren 2,1 km diese bei ungünstigen Voraussetzungen nicht ausgeschlossen werden kann.⁸³ Um die entsprechenden Berechnungen durchführen zu können, ist es notwendig die Quellen für Feinstaub und Stickstoffdioxid zu kennen.

⁸⁰ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 16.

⁸¹ vgl. ebd., S. 21.

⁸² vgl. ebd., S. 46ff.

⁸³ vgl. ebd., S. 48f.

In Abbildung 4.1 sind die Quellen von Feinstaubemissionen dargestellt. Der größte Anteil ist dem Verkehr mit 34 % zuzurechnen. Zwei Drittel dieser Emissionen entstehen durch Abrieb und Aufwirbelungen. Es folgen Bautätigkeit mit 26 %, Gebäudeheizung und Gewerbe mit 10 %, Grillen mit 10 % und Industrie und Kraftwerke mit 6 %. Aufgrund des hohen Anteils besteht dadurch die Möglichkeit für hohe absolute Reduktionen bei kleinen relative Minderungen.

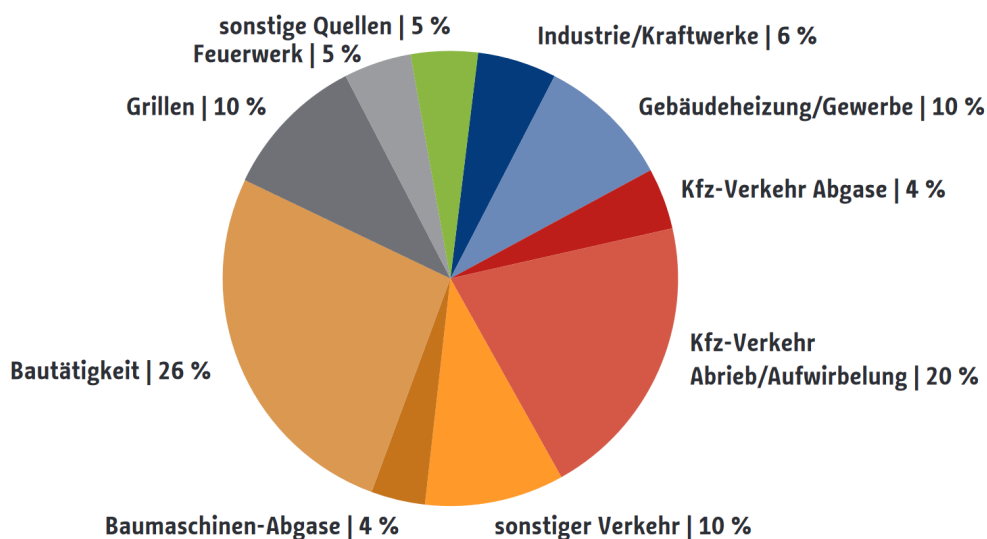


Abbildung 4.1: Anteile der Quellgruppen an den Feinstaubemissionen in Berlin 2015⁸⁴

Die Quellen der Stickstoffoxidemissionen waren im gleichen Jahr anders gelagert. Diese sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Den größten Anteil weist auch hier der Verkehr aus, mit über 48 %, 80 % davon durch Kfz. Danach folgen Industrie und Kraftwerke mit 33 % und Gebäudeheizung mit 11 % Anteil am gesamten Stickstoffdioxidausstoß.

Anhand dieser Berechnung wurden Prognosen bis zum Jahr 2020 erstellt und notwendige Maßnahmen erarbeitet. Diese wurden dabei allerdings noch nicht auf ihre Umsetzbarkeit untersucht. Diese Konzepte lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, zum einen die Maßnahmen mit gesamtstädtischer Wirkung und zum anderen die Maßnahmen mit lokaler Wirkung. Anschließend wurde die Wirksamkeit der Maßnahmen bestimmt.⁸⁵

Als Maßnahmen mit gesamtstädtischer Wirkung wurden sowohl die Verbesserung in der Fahrzeugtechnik als auch eine Förderung des Umweltverbundes untersucht. Durch ein Ersetzen bzw. Nachrüsten von älteren Fahrzeugen lassen sich gegenüber der Prognose für 2020 10 % Stickstoffoxide einsparen: Die größten Einspareffekte treten dabei bei den leichten Nutzfahrzeugen auf.⁸⁶ Die Förderung des Umweltverbundes soll eine Verlagerung des Kfz-Verkehrs hin zum Umweltverbund bewirken und somit eine Reduktion der Luftschadstoffe erreichen. Bei der Förderung des Umweltverbundes wurden zwei

⁸⁴ Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 53.

⁸⁵ vgl. ebd., S. 113.

⁸⁶ vgl. ebd., S. 115.

Subszenarien betrachtet, wobei im zweiten Subszenario eine deutliche Ausweitung der Parkraumbewirtschaftung erfolgt. Im ersten Subszenario kommt es zu einer Stickstoffoxidemissionsreduktion von 1,1 % gegenüber der Vergleichsprognose. Mit einer Erweiterung der Parkraumbewirtschaftung wird eine Reduktion von 6,5 % im Kfz-Bereich modelliert.⁸⁷

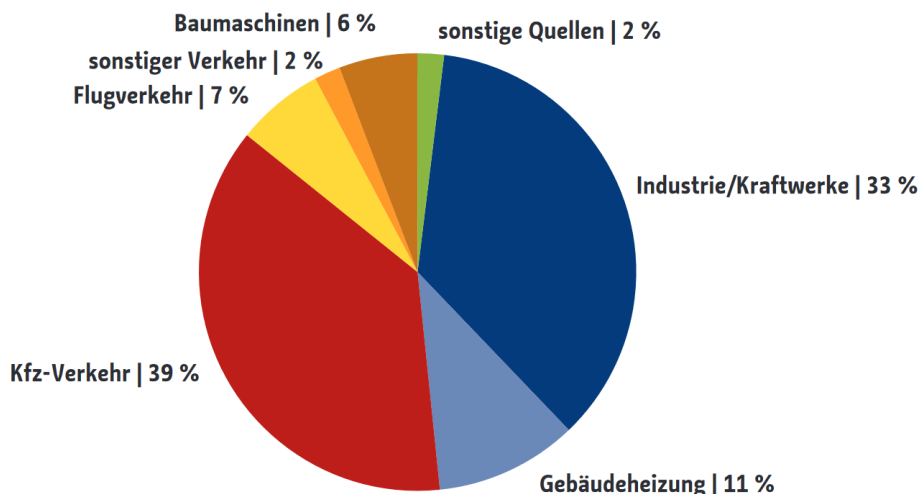


Abbildung 4.2: Anteile einzelner Quellgruppen an der Stickstoffoxidemission in Berlin 2015⁸⁸

Zu den lokal wirkenden Maßnahmen gehören unter anderem eine angepasste Verkehrslenkung,⁸⁹ Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 30 km/h⁹⁰ und Durchfahrtsbeschränkungen für Dieselfahrzeuge.⁹¹ Um die Auswirkungen einer Geschwindigkeitsbeschränkung mit einer zusätzlichen Koordinierung der Lichtsignalanlagen und somit einer Verkehrsverstetigung zu untersuchen, wird dies testweise auf fünf Abschnitten eingeführt. Die ersten vorliegenden Erkenntnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.⁹²

Diese Maßnahmen sind dann in einzelne Maßnahmenpakete zusammengefasst worden, um eine möglichst effektive Reduktion der Feinstaub- und Stickstoffoxidbelastung zu erreichen.⁹³

⁸⁷ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 116f.

⁸⁸ ebd., S. 53.

⁸⁹ vgl. ebd., S. 119.

⁹⁰ vgl. ebd., S. 122.

⁹¹ vgl. ebd., S. 126.

⁹² vgl. ebd., S. 125.

⁹³ vgl. ebd., S. 139.

Leipziger Straße

Wie bereits erwähnt, wurde mit der zweiten Fortschreibung des Berliner Luftreinhalteplanes beschlossen, an fünf Streckenabschnitten testweise die Geschwindigkeit auf 30 km/h zu reduzieren und gleichzeitig eine „grüne Welle“ einzurichten. Anhand der Ergebnisse soll dann eine validierte Einschätzung der Wirksamkeit entstehen. Die Projekte wurden jeweils auf ein Jahr angelegt.⁹⁴ Von den fünf Projekten liegt zum jetzigen Zeitpunkt nur die Auswertung für die Anpassung der Leipziger Straße vor. Aus diesem Grund erfolgt die Ergebnisbetrachtung auch nur für diese.⁹⁵ Für das Projekt wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit zwischen Potsdamer Platz und Markgrafenstraße von 50 km/h auf 30 km/h reduziert, kombiniert mit einer „grünen Welle“.⁹⁶

Start des Projektes war am 9. April 2018. Nach einer Eingewöhnungsphase für den Kfz-Verkehr und einer einjährigen Projektzeit, wurde diese Maßnahme anschließend ausgewertet.⁹⁷ Nachdem Geschwindigkeitskontrollen eingeführt wurden, konnte nach drei Monaten eine deutlich Reduzierung der Stickstoffdioxidbelastung festgestellt werden.⁹⁸ In dem ersten Zwischenfazit nach acht Monaten wurde ein Rückgang von 6 % bzw. um $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verzeichnet.⁹⁹ Die endgültige Auswirkung in der Auswertung des Pilotprojektes fällt mit einem Rückgang von 4 % bzw. um $2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel geringer aus. Vor allem im Winter wurde eine deutliche Abnahme der Stickstoffdioxidbelastung festgestellt. Aufgrund der weiterhin hohen Belastung wird die Geschwindigkeitsbeschränkung über den Pilotzeitraum weiter beibehalten, da diese ein Teil des Maßnahmenkataloges des Luftreinhalteplanes ist und einen Effekt aufweist. Außerdem wurde kein Ausweichverkehr auf andere Straßen festgestellt.¹⁰⁰ In der Modellrechnung war mit Ausweichverkehr gerechnet worden, welcher aber nicht zu Grenzwertüberschreitungen in den betroffenen Straßen führte.¹⁰¹

⁹⁴ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 125.

⁹⁵ vgl. Schulz 2020, o. S.

⁹⁶ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 157.

⁹⁷ vgl. Fröhlich et al. 2018, o. S.

⁹⁸ vgl. Kraetzer 2018, o. S.

⁹⁹ vgl. Neumann 2019, o. S.

¹⁰⁰ vgl. DPA 2020, o. S.

¹⁰¹ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 159.

5 Methodik

Im Folgenden Kapitel wird auf die Verkehrsnetzerstellung, die Nachfragemodellierung, die Verkehrssimulation und die notwendige Anpassungen eingegangen. Die Leipziger Straße ist Teil der Bundesstraße 1 und Teil des Hauptstraßennetzes in Berlin. Als großräumige Straßenverbindung überwiegt die Verbindungsfunktion die Erschließungsfunktion deutlich.¹⁰² Die Bebauung ist größtenteils geschlossen und rund 30 m hoch, die Breite des Straßenraumes liegt zwischen 22 m und 29 m. Dadurch kann ein Luftaustausch nur schwer stattfinden.¹⁰³

Das verwendete Verkehrsnetz entspricht dem derzeitigen Zustand (Winter 2019/20). Das Modell umfasst dabei die Leipziger Straße zwischen Wilhelmstraße und Axel-Springer-Straße, siehe dazu auch Abbildung 5.1. Dazwischen befinden sich fünf weitere Knotenpunkte. Sofern nicht anders beschrieben, sind alle Knotenpunkte durch Lichtsignalanlagen gesichert. Alle Knotenpunkte werden im Folgenden nur mit ihrer Abkürzung bezeichnet, diese sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Knotenpunkte im Untersuchungsraum

Knotenpunkt	Bezeichnung	Abkürzung
Leipziger Straße/Wilhelmstraße	Knotenpunkt 1	KP1
Leipziger Straße/Mauerstraße	Knotenpunkt 2	KP2
Leipziger Straße/Friedrichstraße	Knotenpunkt 3	KP3
Leipziger Straße/Charlottenstraße	Knotenpunkt 4	KP4
Leipziger Straße/Markgrafenstraße	Knotenpunkt 5	KP5
Leipziger Straße/Jerusalemmer Straße	Knotenpunkt 6	KP6
Leipziger Straße/Axel-Springer-Straße	Knotenpunkt 7	KP7

5.1 Verkehrsraumgestaltung

Der untersuchte Streckenabschnitt der Leipziger Straße weist eine Streckenlänge von 1,2 km auf. Der Knotenpunktabstand liegt zwischen KP1 und KP6 zwischen 120 m und 220 m. Zwischen KP6 und KP7 ist der Abstand mit über 500 m deutlich höher, was eine

¹⁰² vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen 2019, o. S.

¹⁰³ vgl. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2019, S. 157.

Koordinierung aufgrund der unterschiedlichen Abstände deutlich erschwert.¹⁰⁴ Westlich des KP4 weist die Leipziger Straße zumeist einen fünfstreifigen Querschnitt auf, davon sind je zwei Fahrstreifen für den durchgehenden Verkehr und ein Fahrstreifen im Knotenpunkt für den linksabbiegenden Verkehr. Diese Bauform trifft auf KP1 und KP3 zu. Am KP2 ist in Fahrtrichtung Westen kein Linksabbiegestreifen vorhanden, da dies dort untersagt ist. Das Rechtsabbiegen erfolgt in diesem Abschnitt immer im Mischverkehr mit dem Geradeausverkehr. Östlich des KP4 existieren zwei getrennte Richtungsfahrbahnen mit je drei Fahrstreifen. Der rechte Fahrstreifen ist ein Bussonderfahrstreifen, der im gesamten Untersuchungszeitraum gültig ist. In Fahrtrichtung Westen steht ein gesonderter Rechtsabbiegestreifen zur Verfügung, ebenso am KP5. Bei diesem handelt es sich um eine Einmündung. In Fahrtrichtung Osten gibt es einen Linksabbiegestreifen. Beim KP6 handelt es sich um zwei versetzte Einmündungen bei einem durchgehenden Mittelstreifen der Leipziger Straße. Diese sind beide nicht signalisiert. Der Mittelstreifen ist ununterbrochen, sodass jeweils nur ein rechts Ein- bzw. Abbiegen möglich ist. Auch der KP7 ist eine Einmündung. In Fahrtrichtung Osten wird die Leipziger Straße auf drei Fahrstreifen für den Geradeausverkehr aufgeweitet, zudem existiert ein gesonderter Rechtsabbiegestreifen. Die Bussonderfahrstreifen sind im Knotenpunktbereich aufgehoben. In westlicher Richtung sind zwei Fahrstreifen für den Geradeausverkehr und zwei Fahrstreifen für den Linksabbiegeverkehr.

Radverkehrsanlagen sind in der Leipziger Straße nicht durchgehend vorhanden. In Fahrtrichtung Osten ist bis zu KP2 ein Schutzstreifen vorhanden und ab KP4 ist der Bussonderfahrstreifen für den Radverkehr freigegeben. Mit einer Breite von teilweise nur 4,00 m bietet er nicht immer eine ausreichende Breite zum Überholen von Radfahrenden durch Busse.¹⁰⁵ An KP7 wird der geradeausfahrende Radverkehr mittels einer Fahrradweiche geführt.¹⁰⁶ In westlicher Fahrtrichtung ist der Bussonderfahrstreifen für den Radverkehr freigegeben. Dieser reicht bis zum KP4, ein Schutzstreifen beginnt erst wieder nach KP1. Auch die zulaufenden Strecken sind im Modell abgebildet, deren Komplexität ist aber stark reduziert. Der Zulauf der Leipziger Straße zum KP1 weist einen vierstreifigen Querschnitt auf und einen beidseitigen Schutzstreifen; der Anschluss an KP7 erfolgt mit zwei je dreistreifigen Richtungsfahrbahnen und beidseitigen Schutzstreifen.

An den KP1 schließt die Wilhelmstraße an. Diese ist beidseitig entweder mit Schutzstreifen oder Radfahrstreifen ausgestattet. Am Knotenpunkt stehen je Richtung ein überbreiter Fahrstreifen, mit einer Breite von mindestens 5,80 m, zur Verfügung. Der Fahrstreifen vom Knotenpunkt in Richtung Süden weist dagegen nur eine Breite von 4,55 m auf. Da ein Nebeneinanderfahren auf einem Fahrstreifen im gewählten Simulationsprozess nicht simuliert werden kann, werden die überbreiten Fahrstreifen mit einer Mindestbreite

¹⁰⁴ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015b, S. 44.

¹⁰⁵ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010, S. 29.

¹⁰⁶ vgl. ebd., S. 49.

von 5,50 m in zwei separate Fahrstreifen aufgelöst. Dies entspricht den Grenzwerten aus der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen für zwei Fahrstreifen.¹⁰⁷

An KP2 kreuzt die Mauerstraße die Leipziger Straße. Diese hat einen zweistreifigen Querschnitt und keine Radverkehrsanlagen. Auch im Knotenpunktbereich steht für jede Fahrtrichtung nur ein Fahrstreifen zur Verfügung. Die nächste Querstraße ist die Friedrichstraße. Nördlich der Leipziger Straße besteht der Querschnitt aus zwei einstreifigen Fahrbahnen, südlich der Leipziger Straße ist auf der freien Strecke ein identischer Querschnitt vorhanden. Im Bereich des Knotenpunktes entfällt der Querschnitt und es stehen in der Zufahrt zwei Fahrstreifen zur Verfügung, einer davon ist für den linkseinbiegenden Verkehr vorgesehen. In südlicher Fahrtrichtung existiert auch hier ein überbreiter Fahrstreifen mit einer Breite von 6,10 m, der analog zu KP1 in zwei Fahrstreifen aufgeteilt wird.

An KP4 kreuzt die Charlottenstraße die Leipziger Straße, gleichzeitig verändert sich der Querschnitt der Leipziger Straße. Der Querschnitt der Charlottenstraße ist zweistreifig und weist keine gesonderten Radverkehrsanlagen auf. Überbreite Fahrstreifen in den Knotenpunktausfahrten werden nicht in zwei Fahrstreifen aufgeteilt, da es keine zweistreifigen Zufahrten zu diesen gibt. Bei KP5 handelt es sich um die Einmündung der Markgrafenstraße. Diese liegt nördlich der Leipziger Straße und weist in der Zufahrt zwei Fahrstreifen auf: einen für Rechts- und einen für Linkseinbieger. Die Ausfahrt besteht aus einem Fahrstreifen. Bei KP6 handelt es sich, wie bereits erwähnt, um die zwei versetzten Einmündungen der Jerusalemer Straße. Beide Straßenteile haben einen zweistreifigen Querschnitt, eine durchgehende Befahrbarkeit wird durch den Mittelstreifen der Leipziger Straße unterbunden. KP7 ist der letzte betrachtete Knotenpunkt, hier mündet die Axel-Springer-Straße von Süden in die Leipziger Straße. Der Querschnitt der Axel-Springer-Straße besteht auf der freien Strecke aus zwei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit einem Schutzstreifen. Im Bereich des Knotenpunktes kommt ein separater Linkseinbiegestreifen hinzu. Die beiden anderen Fahrstreifen sind dem nach rechts in die Leipziger Straße einbiegenden Verkehr vorbehalten.

Alle Straßen weisen beidseitige Gehwege auf und eine Querung ist an allen Knotenpunkten signaltechnisch gesichert möglich. An den beiden Einmündungen der Jerusalemer Straße existiert östlich eine signalisierte Fußgängerfurt. Diese Fußgängerfurt sowie alle anderen sind nicht im Modell abgebildet.

¹⁰⁷ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2006, S. 70.

5.2 Signalzeitenpläne

Die Knotenpunkte der Leipziger Straße sind Teil einer „grünen Welle“. Es werden über den gesamten Tag vier verschiedene Signalpläne verwendet. Früh, Tag, Spät und Nacht. Der nächtliche Signalzeitenplan hat eine Umlaufzeit von 80 Sekunden, alle anderen von 90 Sekunden. Der Frühplan gilt dabei von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr, der Spätplan von 14:00 Uhr bis 20:00 Uhr und der Nachtplan von 2:00 Uhr bis 5:00 Uhr. Während der restlichen Zeiten wird der Tagesplan angewandt, siehe dazu auch Tabelle 5.2. Für alle Knotenpunkte – bis auf KP7 – existieren noch zusätzliche Signalzeitenpläne für eine Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h. Auch diese Signalzeitenpläne sind in einer „grünen Welle“ koordiniert. Einige Knotenpunkte weisen zudem die Möglichkeit einer verkehrsabhängigen Steuerung auf, diese ist aber an allen Knotenpunkten außer Betrieb. Die Signalzeitenpläne wurden durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz bereitgestellt.

Tabelle 5.2: Verwendete Signalzeitenpläne

Plan	Umlaufzeit	Gültigkeit
Nacht	80 s	02:00 Uhr - 05:00 Uhr
Tag	90 s	05:00 Uhr - 06:00 Uhr
Früh	90 s	06:00 Uhr - 10:00 Uhr
Tag	90 s	10:00 Uhr - 14:00 Uhr
Spät	90 s	14:00 Uhr - 20:00 Uhr
Tag	90 s	20:00 Uhr - 02:00 Uhr

5.3 Verkehrsmodellierung

Im folgenden Abschnitt werden die vorhandenen Verkehrsbelastungen und die notwendigen Anpassungen für das Modell betrachtet. In Abbildungen 5.1 ist die Verkehrsbelastung zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr dargestellt. Die Zeitpunkte der Erhebung liegen zwischen den Jahren 2012 und 2019. Die Knotenpunkte KP4 und KP5 wurden im Dezember 2012 erhoben. Im Mai 2018 wurde KP6 und im Dezember desselben Jahres KP3 erhoben. KP1 wurde im März und KP2 und KP7 Oktober 2019 erhoben. Somit liegen – bis auf KP4 und KP5 – alle Knotenpunkte im Zeitraum, in dem schon eine Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h galt. Die Verkehrserhebungen wurden durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz bereitgestellt. Die höchsten Belastungen treten dabei mit 49.426 Kfz/12h östlich von KP7 auf. Die niedrigsten Querschnittsbelastungen treten am westlichen Ende der Leipziger Straße auf. An KP1 wurden 32.524 Kfz gezählt und an KP2 31.882 Kfz. Die Querstraße mit der höchsten Belastung ist die Axel-Springer-Straße

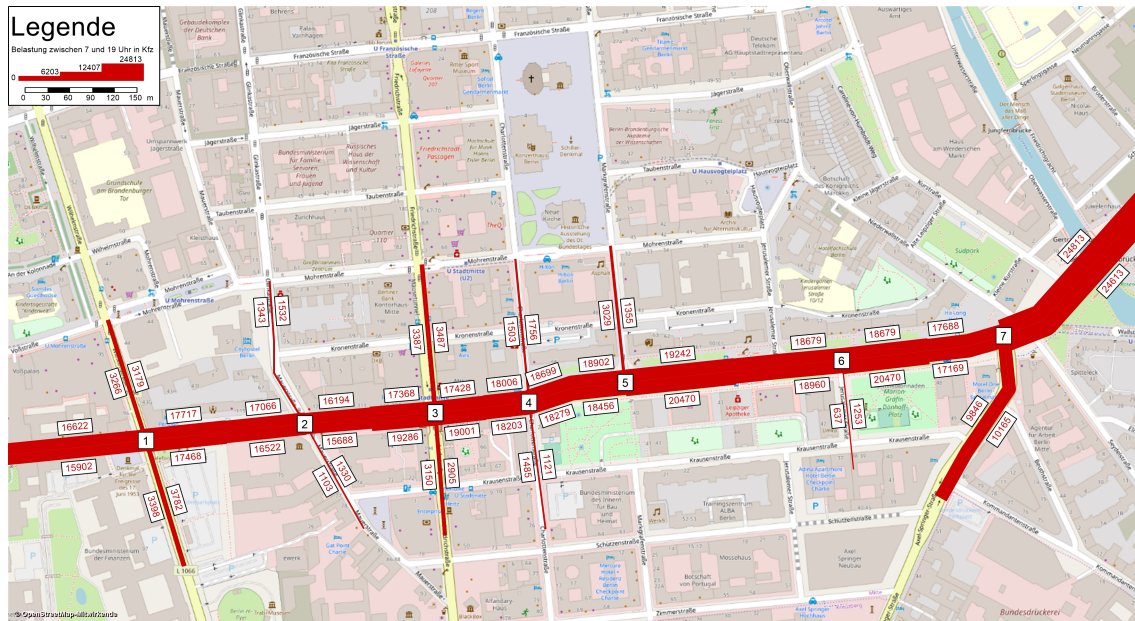


Abbildung 5.1: Ist-Verkehrsbelastung von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr¹⁰⁸

mit einer Querschnittsbelastung von 20.011 Kfz/12h. In den anderen Straßen liegt die Querschnittsbelastung bei maximal 6.874 Kfz/12h. Problematisch für die Modellierung sind zum einen die unterschiedlichen Erhebungszeiträume und zum anderen die Belastungsunterschiede zwischen den einzelnen Knotenpunkten. Aufgrund dessen ist eine Rekalibrierung notwendig. Diese erfolgte anhand von KP7, da dieser mit KP2 eine der neuesten Erhebungen aufweist.

In Abbildung 5.2 sind die im Modell verwendeten Verkehrsstärken dargestellt. Zwischen den einzelnen Knotenpunkten treten mit den angepassten Verkehrsstärken keine Belastungssprünge mehr auf. Die Belastungen sind dabei für jede Stunde von KP7 ausgehend angepasst worden. Damit die Verhältnisse der Knotenströme erhalten bleiben, wurden die Belastungen der kreuzenden Straßen ebenfalls angepasst. Die mittleren Anpassungsfaktoren sind in Tabelle A.1 dargestellt. Durch diese Anpassungen kommt es im Vergleich zu den Verkehrserhebungen zu Abweichungen, diese sind in Abbildung 5.3 dargestellt. In Grün dargestellt werden dabei Belastungen, welche kleiner sind als die erhobenen, in Rot die größeren. An KP7 treten durch das gewählte Vorgehen keine Veränderungen auf, auch an KP2, der einen Tag nach KP7 erhoben wurde, treten nur geringfügige Änderungen auf. An KP4 und KP5 treten große Abnahmen der Verkehrsbelastungen auf, allerdings sind diese Erhebungen auch sieben Jahre älter, sodass dort ein tatsächlich geändertes Mobilitätsverhalten möglich ist. Auch an KP1, KP3 und KP6 nimmt die Belastung ab.

¹⁰⁸ eigene Darstellung nach © OpenStreetMap-Mitwirkende 2020, o. S.

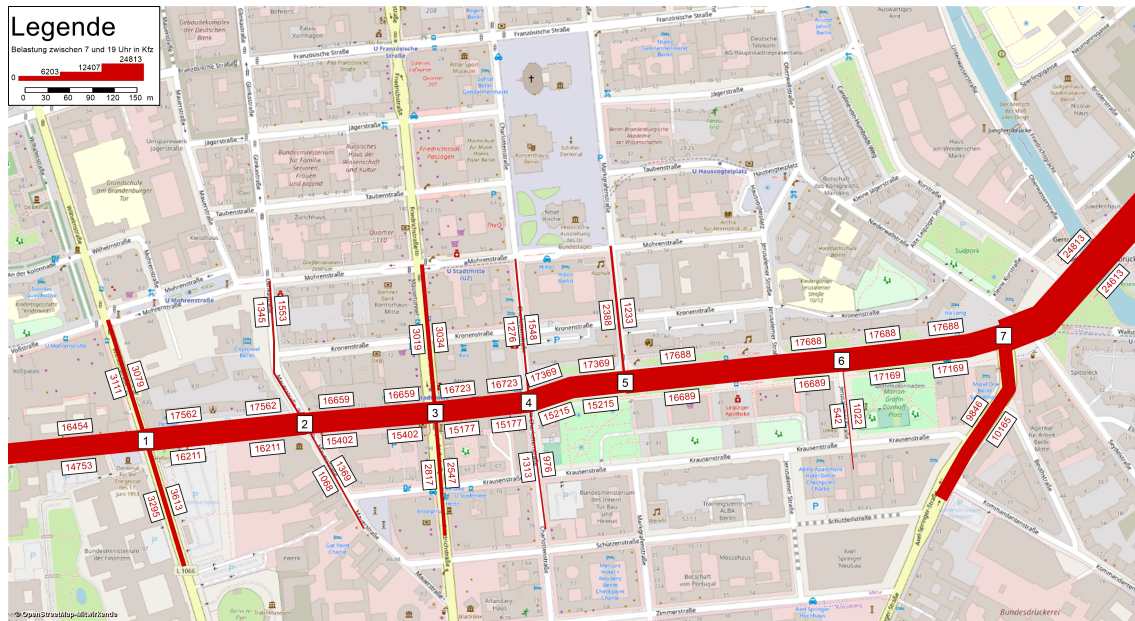


Abbildung 5.2: Angepasste Verkehrsbelastung von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr¹⁰⁹

Die geringste Abnahme hat dabei KP1 zu verzeichnen, dessen Erhebungszeitpunkt sieben Monate vor dem von KP7 liegt. Die Reduktionen an KP3 und KP6 finden vor allem in Fahrtrichtung Osten statt. Dort hat es scheinbar die größten Veränderungen im Verkehrsverhalten gegeben. Durch die Anpassung der Belastungen anhand von KP7 werden auch die Tagesganglinien der anderen Knotenpunkte an KP7 angepasst. Exemplarisch ist dies für die Querschnitte direkt östlich von KP1 und westlich von KP7 in Abbildung 5.4 dargestellt. An KP1 ist kaum eine Veränderung der Verkehrsnachfrage im Tagesverlauf feststellbar, in der Abbildung Blau dargestellt. Ein leichter Nachfrageeinbruch ist zwischen 12:00 Uhr und 14:00 Uhr zu verzeichnen. An KP7 ist bis 13:00 Uhr eine konstante Nachfrage zu verzeichnen, welche anschließend konstant sinkt, diese ist in Orange dargestellt. Der Übergang der Ganglinien der anderen Querschnitte zwischen KP1 und KP7 ist dabei fließend. Die angepasste Belastung für den Querschnitt an KP1 ist in Grau dargestellt, die Querschnittsbelastung an KP7 hat sich nicht verändert. Diese hat die Form der Ganglinie von KP7 angenommen und weist ab 14:00 Uhr eine abnehmende Verkehrsnachfrage auf. Dies führt in Summe zu 1.412 Kfz weniger, wobei sich der Unterschied nicht gleichmäßig über den Tag verteilt.

Aus Gründen der Vereinfachung wurden noch ein paar Änderungen des abgebildeten Verkehrs vorgenommen. Der modellierte Verkehr wird nur in Pkw und Lkw unterteilt, eine Berücksichtigung anderer Verkehrsmittel findet nicht statt. Somit wird kein Rad- und Fußverkehr modelliert. Die entsprechenden Verkehrsräume sind im Modell aber enthalten. Auch eine gesonderte Berücksichtigung des Busverkehrs findet nicht statt. Dies geschieht

¹⁰⁹ eigene Darstellung nach © OpenStreetMap-Mitwirkende 2020, o. S.

aufgrund der geringen Dichte des Busverkehrs (10-Minuten-Takt).¹¹⁰ Auch ist östlich von KP4 ein beidseitiger Bussonderfahrstreifen vorhanden, sodass hier kaum Beeinflussung durch den übrigen Verkehr stattfinden kann.

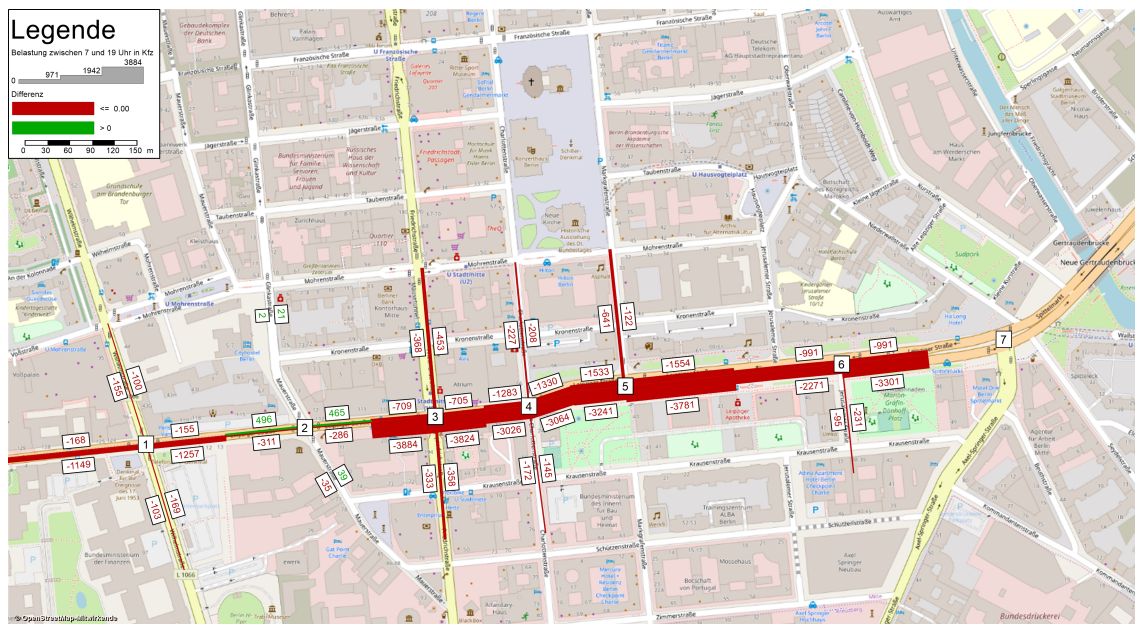


Abbildung 5.3: Differenz der Verkehrsbelastungen von 7:00 Uhr bis 19:00 Uhr¹¹¹

Da auch der Taxiverkehr nicht gesondert berücksichtigt wird, kommt es im Bereich der Bussonderfahrstreifen zu einer erhöhten Belastung der übrigen Fahrstreifen, da der Bussonderfahrstreifen im Modell von keinen Fahrzeugen genutzt wird. Aufgrund der fehlenden Daten zum durch Taxis realisierten Verkehrsaufkommen, war dies nicht anders zu lösen, auch andere den Bussonderfahrstreifen nutzende Gruppen trifft dies. Wegen des entfallenden Fußgängerverkehrs sind auch keine Fußgängerfurten dargestellt, eine signaltechnische Berücksichtigung dieser ist aber aufgrund der Übernahme der verwendeten Signalzeitenpläne gegeben. Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, wurden auch die meisten überbreiten Fahrstreifen in zwei einzelne Fahrstreifen aufgelöst.

Auch im Bereich der Simulation wurden diverse Änderungen vorgenommen, um einen realistischeren Ablauf zu gewährleisten. Zum einen wird die Fahrzeuglänge im Pkw-Bereich auf 4,5 m festgesetzt, auch die minimale Lücke im Stillstand zwischen zwei Fahrzeugen (minGap) wird auf 0,5 m verkürzt. Der Parameter speedFactor wird abhängig vom gewählten Szenario gesetzt, siehe dazu Kapitel 5.4. Für die Emissionsmodellierung werden nur Diesel- und Benzinmotoren mit Euro 6/VI verwendet. In Berlin waren 2019 rund 75 % der Pkw mit Benzinantrieb und 25 % mit Dieselantrieb zugelassen. Andere Antriebsarten haben zusammen einen Anteil von zwei Prozent und werden deshalb im

¹¹⁰ vgl. BVG Bereich Angebot 2019, S. 1.

¹¹¹ eigene Darstellung nach © OpenStreetMap-Mitwirkende 2020, o. S.

5 Methodik

Folgenden nicht berücksichtigt.¹¹² Auf Grundlage dieser Aufteilung erfolgt auch die Unterteilung im Modell nur zwischen Benzin und Diesel im oben genannten Verhältnis.

Damit die Kapazitäten im Netz ausreichend sind, ist es notwendig τ auf 0,5 zu setzen. Dadurch ist es erforderlich auch die Simulation in 0,5 s-Schritten durchzuführen. Um Rückstau zu vermeiden, werden Fahrzeuge bereits nach 120 s teleportiert, falls diese auf einem falschen Fahrstreifen sind und ihre Route nicht weiterverfolgen können. Bei der Teleportation wird das Fahrzeug von der Stelle, an der es nicht weiter kommt, zum nächsten Abschnitt auf seiner Route gesetzt.

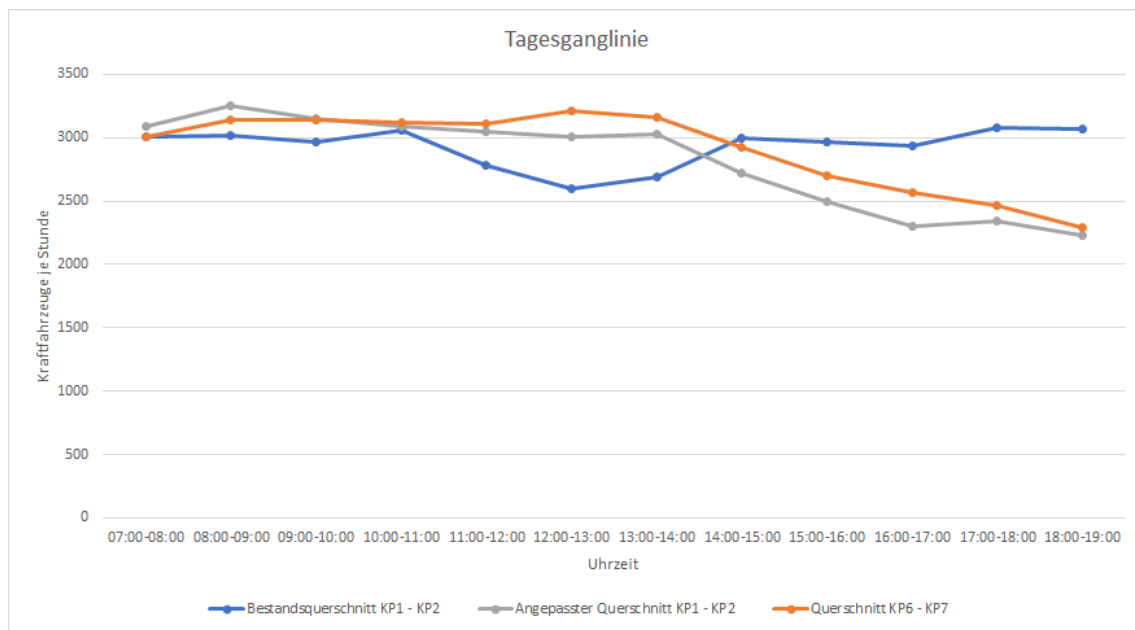


Abbildung 5.4: Tagesganglinie zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr¹¹³

Um den Einfluss von Zufallseffekten zu minimieren, wird jeder Planfall mit fünf unterschiedlichen Startzufallszahlen (100 bis 104) simuliert. Diese geringe Anzahl an Iterationen ist aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den einzelnen Durchläufen als ausreichend zu betrachten. Die Simulation umfasst den Zeitraum von 5:00 Uhr bis 21:00 Uhr. Ausgewertet wird allerdings nur der Zeitraum zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr, da nur für diesen Verkehrsnachfrage gegeben ist. Der Vorlauf und Nachlauf ist zur kontinuierlichen Befüllung des Netzes notwendig und findet mit reduzierter Nachfrage der Zeitscheiben 7:00 Uhr bis 8:00 Uhr und 18:00 Uhr bis 19:00 Uhr statt.

¹¹² vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2019, o. S.

¹¹³ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

5.4 Szenarien

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen untersuchten Fälle kurz erläutert. Diese sind dabei in drei Gruppen zusammengefasst. Die drei Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich der erlaubten zulässigen Höchstgeschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 und der dafür standardmäßig verwendeten Koordinierung. Planfallgruppe 1 hat eine erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h, Planfallgruppe 2 von 40 km/h und Planfallgruppe 3 von 30 km/h. Für die Planfallgruppen 1 und 3 werden sechs Unterfälle betrachtet, für die Planfallgruppe 2 nur zwei. Zuerst wird die koordinierte Variante betrachtet. Diese wird zweimal untersucht. Im ersten Fall halten die Fahrzeuge die erlaubte Höchstgeschwindigkeit ein, im zweiten dürfen sie diese um 30 % überschreiten. Diese beiden Fälle werden in allen Gruppen betrachtet, die folgenden nicht in der Gruppe 2. Diese Überschreitung wird in SUMO über den `speedFactor` geregelt. Dieser zweite Fall spiegelt die in der Realität gemessenen Geschwindigkeiten realistischer wider. Im Rahmen des Pilotprojektes an der Leipziger Straße wurde an sechs Messquerschnitten die Freiflussgeschwindigkeit bei 50 km/h und bei 30 km/h gemessen. Dabei wurde in beiden Fällen eine erhebliche Überschreitung der erlaubten Geschwindigkeit festgestellt.¹¹⁴ Aus diesem Grund wird diese überhöhte Geschwindigkeit auch für die anderen Planfälle verwendet. Dies wäre eine verkehrsabhängige Steuerung und eine Untersuchung dazu, welcher Signalzeitenplan bei einem Entfall des Wechsels der Signalzeitenpläne über den gesamten Zeitraum die größten Reduktionen realisiert. Diese Fälle werden untersucht, da es gerade zu den Wechseln der Signalzeitenpläne zu einem Anstieg der Wartezeiten kommt und somit eine nicht optimale Schaltung vermutet werden kann. Die verkehrsabhängige Steuerung ist verlustzeitbasiert und versucht damit die Verlustzeiten an jedem einzelnen Knotenpunkt zu minimieren, eine netzweite Betrachtung findet hierbei nicht statt. Die Planfälle sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

¹¹⁴ vgl. VMZ Berlin c/o Rumen Genow 2018, S. 13.

Tabelle 5.3: Planfälle

Name	Geschwindigkeit	speed-Factor	Signalzeitenpläne			Verkehrs-abhängigkeit
			Früh	Spät	Tag	
Planfall 1.1	50 km/h	1,0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 1.2	50 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 1.3	50 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ja
Planfall 1.4	50 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nein
Planfall 1.5	50 km/h	1,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nein
Planfall 1.6	50 km/h	1,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 2.1	40 km/h	1,0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 2.2	40 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 3.1	30 km/h	1,0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 3.2	30 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein
Planfall 3.3	30 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ja
Planfall 3.4	30 km/h	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nein
Planfall 3.5	30 km/h	1,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nein
Planfall 3.6	30 km/h	1,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein

6 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Planfälle hinsichtlich ihrer Ergebnisse dargestellt und verglichen. Die Auswertung erfolgt dabei, sofern nicht anders angegeben zwischen KP1 und KP7 sowie zwischen KP1 und KP5. Der zweite Abschnitt entspricht dabei zum großen Teil der Strecke, auf der das in Kapitel 4 beschriebene Pilotvorhaben durchgeführt wurde. Alle Daten sind dabei in 15-Minuten-Intervalle zusammengefasst. Dabei werden zu Beginn die Planfälle mit unterschiedlichem SpeedFactor, anschließend die verkehrsabhängige Steuerung und schließlich die verschiedenen Signalzeitenpläne betrachtet. Zu Beginn jeden Abschnittes wird ein Blick auf die gefahrenen Geschwindigkeiten geworfen, anschließend werden die Wartezeiten und abschließend die Schadstoffemissionen betrachtet. Als Abschluss erfolgt noch eine kurze Betrachtung der Güte der Koordinierung.

6.1 speedFactor

In diesem Abschnitt werden die Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2 dahingehend untersucht, welche Auswirkungen verschiedene speedFactor auf die gefahrene Geschwindigkeit, die Wartezeiten und schließlich die Emissionen haben.

6.1.1 Geschwindigkeit

In diesen Abschnitt werden die Planfälle hinsichtlich ihres Geschwindigkeitsniveaus betrachtet. In Abbildung 6.1 ist das absolute Geschwindigkeitsniveau im Tagesverlauf abgetragen. Der Fokus liegt hierbei jeweils auf den ersten beiden Planfällen einer Planfallgruppe, siehe dazu Tabelle 5.3. Diese weisen einen unterschiedlichen speedFactor auf. Durch den höheren speedFactor ist in den Planfällen 1.2, 2.2 und 3.2 jeweils eine höhere Geschwindigkeit möglich, welche auch realisiert wird. Die Geschwindigkeit wird im Folgenden immer in m/s angegeben. Dabei gilt: $50 \text{ km/h} = 13,89 \text{ m/s}$, $40 \text{ km/h} = 11,11 \text{ m/s}$ und $30 \text{ km/h} = 8,33 \text{ m/s}$.

6 Auswertung

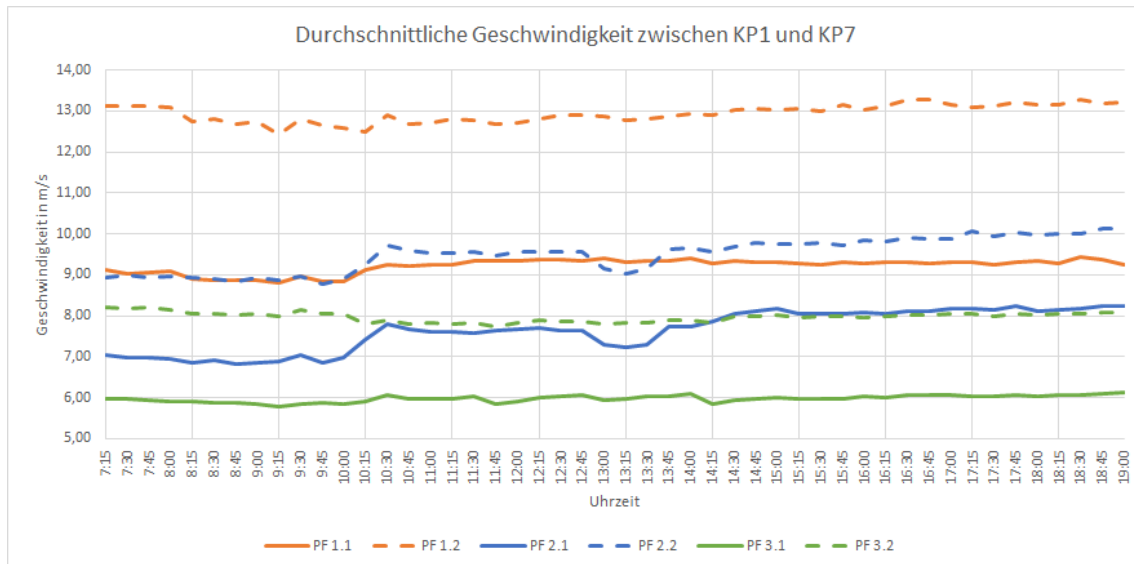


Abbildung 6.1: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹¹⁵

Im Tagesverlauf sind dabei für alle Planfallgruppen keine größeren Veränderungen des Niveaus festzustellen. Ab 10:00 Uhr ist für die Planfallgruppe 2 (blau) eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen Geschwindigkeit um etwa $1,0 \text{ m/s}$ zu verzeichnen. Auch in der Planfallgruppe 1 (orange) tritt diese auf, fällt allerdings mit etwa $0,3 \text{ m/s}$ deutlich geringer aus. Für die Planfallgruppe 3 (grün) ist keine solche Änderung zu verzeichnen. Die Veränderung um 10:00 Uhr fällt mit dem Wechsel des Signalzeitenplanes von Früh auf Tag zusammen, dieser mögliche Zusammenhang wird gesondert in Kapitel 6.3 betrachtet (zu den verwendeten Signalzeitenpläne siehe Tabelle 5.2). Bei der Planfallgruppe 2 kommt es gegen 13:00 Uhr zu einer temporären Reduzierung der durchschnittlichen Geschwindigkeit um bis zu $0,5 \text{ m/s}$. Dies spiegelt sich auch in einer erhöhten Wartezeit wieder, siehe dazu Kapitel 6.1.2. Die Unterschiede in der erlaubten Höchstgeschwindigkeit bleiben erhalten, ebenso die Unterschiede im verwendeten speedFactor.

In Abbildung 6.2 ist das gleiche Thema dargestellt, allerdings beschränkt sich die Auswertung hierbei auf den Bereich zwischen KP1 und KP5, welcher auch einen deutlich niedrigeren Knotenpunktabstand aufweist. Es ergibt sich ein ähnlicher Verlauf, wie auch in Abbildung 6.1. Allerdings fällt der Zuwachs der durchschnittlichen Geschwindigkeit um 10:00 Uhr in der Planfällen 1.1, 2.1 und 2.2 erheblicher aus. In der Planfallgruppe 2 nimmt die mittlere Geschwindigkeit um $1,3 \text{ m/s}$, im Planfall 1.1 um $0,7 \text{ m/s}$ zu. Die Delle in der mittleren Geschwindigkeit in der Planfallgruppe 2 um 13:00 Uhr tritt zwischen KP1 und KP5 nicht auf, da die Ursache für die erhöhte Wartezeit zwischen KP5 und KP7 liegt.

¹¹⁵ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

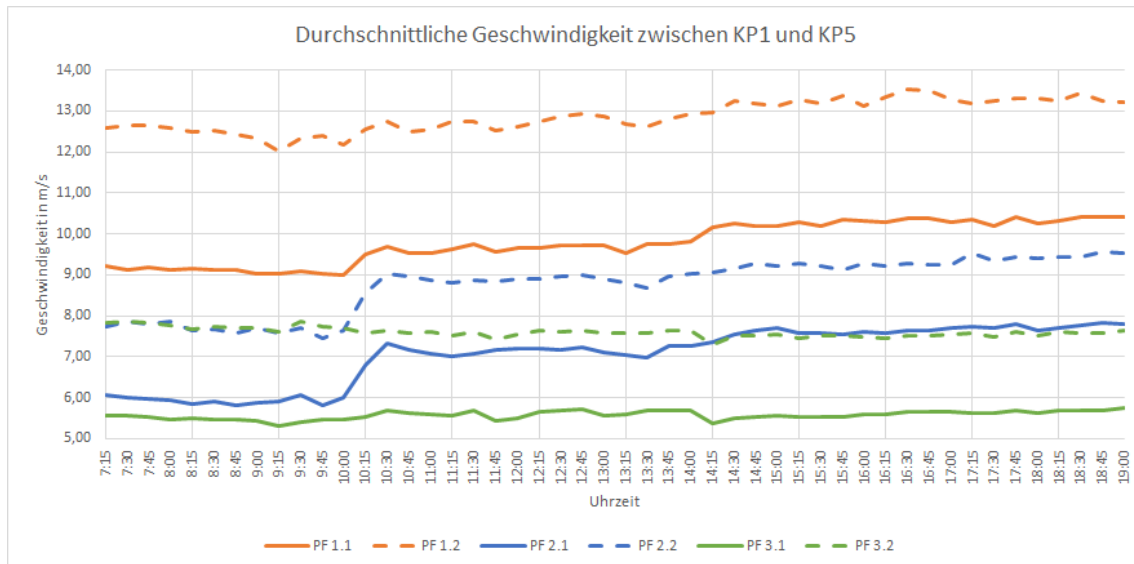


Abbildung 6.2: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹¹⁶

Ebenfalls auffällig ist, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit bei Planfall 2.2 und 3.2 bis 10:00 Uhr fast identisch ist und bei Planfall 2.1 und 3.1 der Planfall 2.1 nur eine geringfügig höhere Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist. Der Unterschied in der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 2,77 m/s tritt hier fast gar nicht auf.

Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsstrecken treten unterschiedliche durchschnittliche Geschwindigkeiten auf, diese sind exemplarisch für drei 15-Minuten-Intervalle in Tabelle 6.1 dargestellt. Auffällig ist, dass der höhere Knotenpunktabstand in allen Planfällen zu einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit führt. Ausnahme hiervon ist nur Planfall 1.1: Dort ist es genau umgekehrt. Die Unterschiede liegen dabei zwischen wenigen Zentimetern pro Sekunde und bis zu einem Meter, meistens im Bereich von 0,3 m/s.

Es ist also festzuhalten, dass die kürzere Untersuchungsstrecke zu Veränderungen in der Geschwindigkeitskurve, als auch zu einem generellen Geschwindigkeitsunterschied führt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit in Bezug auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit zu erhalten, sind in Abbildung 6.3 die gefahrenen Geschwindigkeiten auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit bezogen. Die Untersuchungsstrecke erstreckt sich zwischen KP1 und KP7. Deutlich erkennbar ist der Unterschied zwischen dem speedFactor 1,0 und dem speedFactor 1,3. Bei ersterem liegt die relative Geschwindigkeit zwischen 0,61 und 0,74, bei zweiterem zwischen 0,90 und 0,98. Planfall 2.2 weicht davon ab und liegt zwischen 0,80 und 0,91. Der Verlauf der Kurven ist analog zum Verlauf der Durchschnittsgeschwindigkeit in Abbildung 6.1. Bei den Planfällen 1.1, 2.1 und 3.1 weist 3.1 die höchste relative Geschwindigkeit auf. Im Bereich ab 14:00 Uhr, also des Signalzeitenplanes Spät

¹¹⁶ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

Tabelle 6.1: Unterschiede der durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf verschiedenen Auswertungsstrecken

Planfall	8:00 Uhr bis 8:15 Uhr		13:00 Uhr bis 13:15 Uhr		18:00 Uhr bis 18:15 Uhr	
	KP1-KP5	KP1-KP7	KP1-KP5	KP1-KP7	KP1-KP5	KP1-KP7
1.1	9,16 m/s	8,91 m/s	9,54 m/s	9,32 m/s	10,31 m/s	9,27 m/s
1.2	12,49 m/s	12,76 m/s	12,69 m/s	12,76 m/s	13,24 m/s	13,27 m/s
2.1	5,84 m/s	6,85 m/s	7,05 m/s	7,23 m/s	7,71 m/s	8,16 m/s
2.2	7,64 m/s	8,92 m/s	8,80 m/s	9,03 m/s	9,45 m/s	10,00 m/s
3.1	5,50 m/s	5,90 m/s	5,60 m/s	5,97 m/s	5,70 m/s	6,08 m/s
3.2	7,67 m/s	8,04 m/s	7,59 m/s	7,83 m/s	7,59 m/s	8,05 m/s

weist 2.1 mit ungefähr 0,72 eine ähnlich hohe relative Geschwindigkeit auf. Im Bereich des Frühplanes weist 2.1 allerdings mit 0,62 die niedrigste relative Geschwindigkeit auf.

Bei den Planfällen 1.2, 2.2 und 3.2 wird eine höhere relative Geschwindigkeit erreicht, allerdings sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Planfällen deutlicher. Planfall 2.2 weist dabei die niedrigste relative Geschwindigkeit auf und liegt meist um 0,05 niedriger als Planfall 1.2. Planfall 3.2 weist durchgehend die höchste relative Geschwindigkeit auf. Im Bereich des Signalzeitenplanes Früh bis 10:00 Uhr ist der Unterschied mit bis zu 0,4 zu Planfall 1.2 deutlich höher als im restlichen Tagesverlauf.

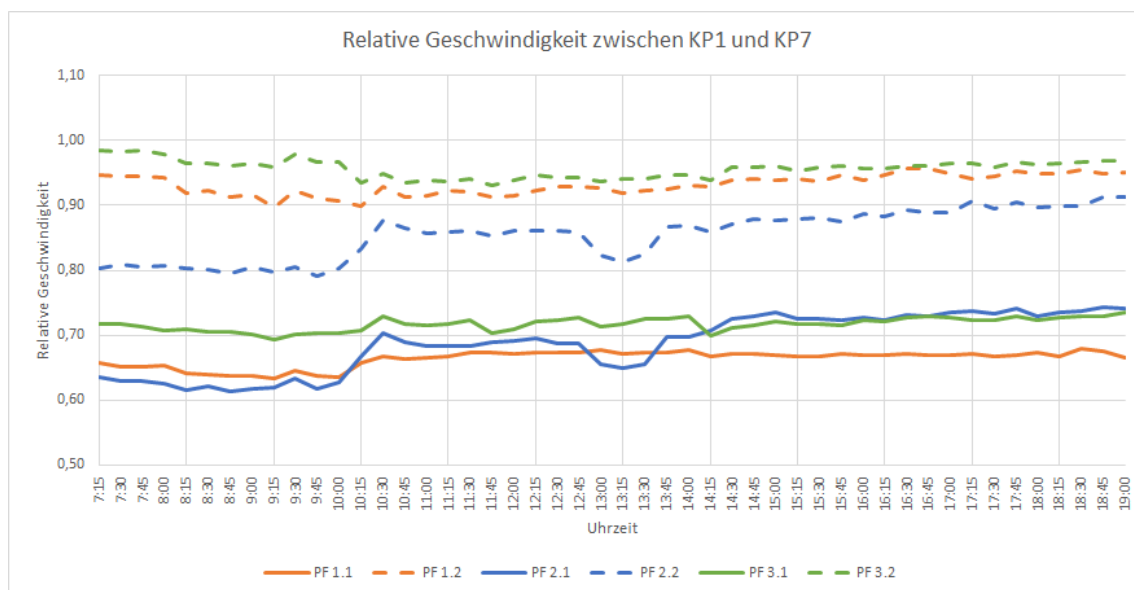


Abbildung 6.3: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹¹⁷

Auch in diesem Fall kommt es bei einer Verkürzung der Untersuchungsstrecke bis KP5 zu deutlichen Unterschieden. Dadurch verändern sich auch die Beziehungen der Planfälle zueinander. Dies ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Der Verlauf der Kurven verändert

¹¹⁷ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

sich dabei aber nicht grundlegend zu denen in Abbildung 6.2. Die Planfälle 1.1, 2.1 und 3.1 weisen ab 10:00 Uhr eine ähnliche relative Geschwindigkeit zwischen 0,63 und 0,73 auf, wobei Planfall 1.1 die höchste relative Geschwindigkeit hat. Während der Gültigkeit des Signalzeitenplanes Tag weist 3.1 eine höhere relative Geschwindigkeit als 2.1 auf, während der Gültigkeit des Signalzeitenplanes Spät ist dies umgekehrt. Im Bereich des Signalzeitenplanes Früh haben 1.1 und 3.1 eine nahezu identische relative Geschwindigkeit von 0,66, die von Planfall 2.1 weist mit 0,53 davon deutlich nach unten ab. Diese Abweichung ist größer als die der gesamten Strecke und somit liegt die Ursache für diese Verzögerung wahrscheinlich zwischen KP1 und KP5.

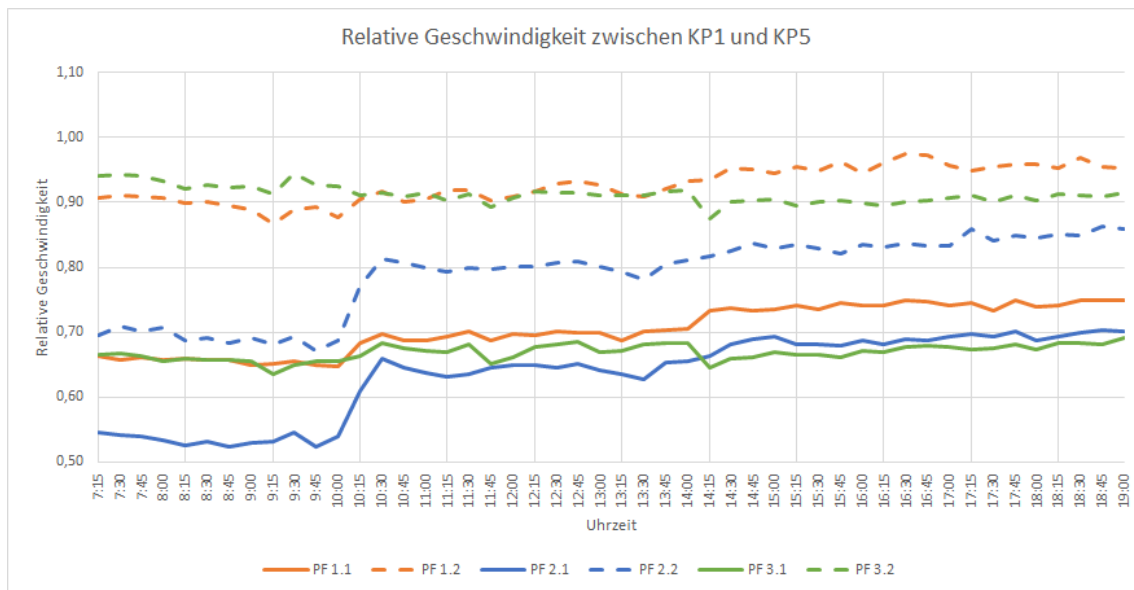


Abbildung 6.4: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹¹⁸

Dies führt dann auch dazu, dass die relative Geschwindigkeit in Planfall 2.2 mit 0,70 bis 10:00 Uhr nur geringfügig höher ist als in den Planfällen 1.1 und 3.1, obwohl in diesem die Agenten eine Geschwindigkeit anstreben, welche 30 % höher ist als die erlaubte Geschwindigkeit. Planfall 2.2 weist zwischen KP1 und KP5 durchgehend eine geringere Geschwindigkeit auf als Planfall 1.2 und 3.2. Dies ist identisch zum Verhalten auf der gesamten Strecke. In dem Verhältnis zwischen Planfall 1.2 und 3.2 gibt es dagegen Unterschiede: Bis 10:00 Uhr weist Planfall 3.2 und ab 14:00 Uhr Planfall 1.2 eine leicht höhere relative Geschwindigkeit auf. Zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden Planfällen. Dadurch wird deutlich, dass die Zeitverluste im Planfall 1.2 vor allem im Bereich zwischen KP5 und KP7 größer sind als im Planfall 3.2.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Planfälle 1.1 und 3.1 beide eine ähnliche optimale Steuerung im Bezug auf die Geschwindigkeit aufweisen, beim Planfall 2.1 kommt

¹¹⁸ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

es stellenweise zu Abweichungen. Wenn man berücksichtigt, dass die tatsächlich im freien Verkehr gefahrenen Geschwindigkeiten höher sind als die Erlaubten, treten die Unterschiede vor allem in den verschiedenen Steuerungen zu Tage, allerdings ermöglicht auch hier keine Signalsteuerung einen eindeutig schnelleren Verkehrsfluss über den gesamten Tag.

6.1.2 Wartezeit

In diesem Abschnitt wird auf die Unterschiede in der Wartezeit zwischen den unterschiedlichen Planfällen eingegangen. In Abbildung 6.5 ist die Gesamtwartezeit zwischen KP1 und KP7 innerhalb von 15-Minuten-Intervallen abgetragen. Deutlich erkennbar ist

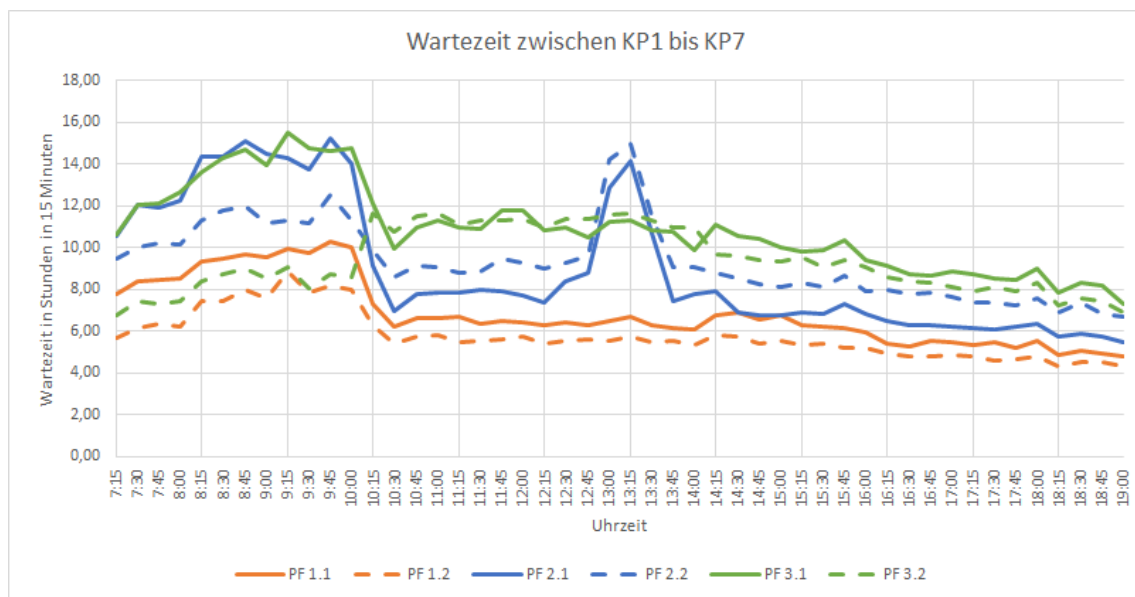


Abbildung 6.5: Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹¹⁹

in allen Planfallgruppen die erhöhte Wartezeit bis 10:00 Uhr, danach nimmt diese, bis auf Planfall 3.2, sprunghaft ab. Die Planfallgruppe 1, weist generell die niedrigsten Wartezeiten auf. Dort weisen beide Planfälle auch einen ähnlichen Verlauf auf. Auch die beiden Planfälle der Gruppe 2 weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Wobei bis 10:00 Uhr der Planfall 2.1 eine höhere Wartezeit und anschließend der Planfall 2.2 eine höhere Wartezeit aufweist. Auffällig ist in beiden Planfällen der starke Anstieg der Wartezeit um 13:00 Uhr, welcher sich auch im vorhergehenden Abschnitt 6.1.1 in den niedrigeren Geschwindigkeiten widerspiegelte. In der Planfallgruppe 3 gibt es dann Unterschiede im Verlauf. Während die Planfälle 2.1 und 3.1 bis 10:00 Uhr eine identisch hohe Gesamtwartezeit haben und Planfall 3.1 danach etwas weniger stark absinkt als Planfall 2.1, liegt

¹¹⁹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

die Wartezeit von Planfall 3.2 bis 10:00 Uhr auf dem zweitniedrigsten Niveau und steigt dann auf das Niveau von Planfall 3.1 an. Bis 10:00 Uhr, also mit dem Signalzeitenplan Früh, lassen sich durch eine höhere Geschwindigkeit die Wartezeiten deutlich reduzieren. Ein höherer speedFactor führt aber nicht generell zu einer Erhöhung oder Verringerung der Wartezeit.

In der folgenden Abbildung 6.6 wird die Wartezeit ausschließlich für den Abschnitt zwischen KP1 und KP5 betrachtet. Die Planfälle 1.1, 1.2 und 3.1 weisen dabei kaum Veränderungen im Verlauf auf. Auch in den Planfällen 2.1 und 2.2 fällt nur die starke Wartezeitzunahme am Mittag weg. Auffällig ist dagegen, dass die Wartezeit im Planfall 3.2 ab 10:00 Uhr deutlich weniger stark zunimmt bzw. vorher schon auf einem höheren Niveau war. Dies lässt darauf schließen, dass im Abschnitt zwischen KP5 und KP7 bis 10:00 Uhr im Verhältnis weniger Wartezeit entsteht.

Da die Gesamtwartezeit auch stark davon abhängig ist, wie viele Fahrzeuge sich im Verkehrsnetz befinden und die Fahrzeuge bei einer niedrigeren erlaubten Geschwindigkeit generell länger zum Passieren dieses Verkehrsnetzes benötigen und sich somit mehr Fahrzeuge im Verkehrsnetz befinden, wird im Folgenden näher auf die Wartezeit je Fahrzeug eingegangen. Betrachtet werden dabei allerdings nur die Fahrzeuge, welche das Netz in der gesamten Ausdehnung durchquert haben. Auch die Wartezeit bezieht sich auf die gesamte Strecke und beginnt somit vor der Koordinierung.

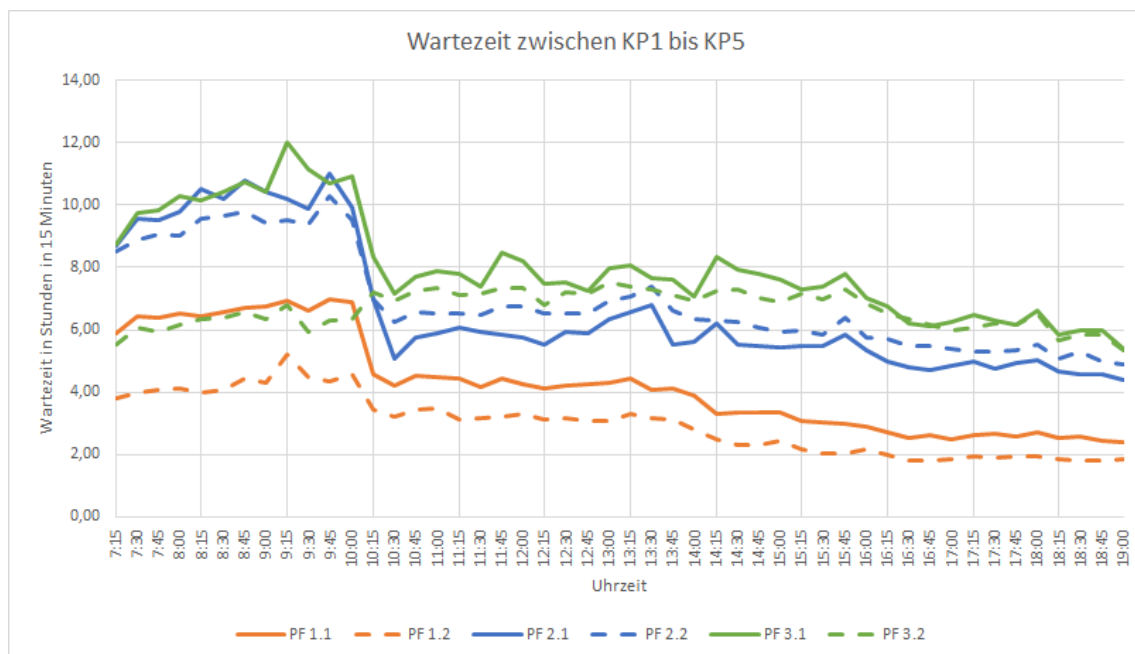


Abbildung 6.6: Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²⁰

¹²⁰ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

In Abbildung 6.7 ist die mittlere Wartezeit je Fahrzeug in Fahrtrichtung Osten und in Abbildung 6.8 die Fahrtrichtung Westen angegeben. Es wird deutlich, dass die mittlere Wartezeit stark von der Fahrtrichtung abhängt. Dies liegt daran, dass die Koordinierung aufgrund der uneinheitlichen Knotenpunktabstände nur für eine Fahrtrichtung optimal ausgelegt werden kann und die bevorzugte Fahrtrichtung sich im Tagesverlauf ändern kann, siehe dazu Kapitel 3.2.

In Fahrtrichtung Westen lässt sich im Verlauf der mittleren Wartezeiten deutlich der Wechsel der Signalzeitenpläne nachvollziehen, dabei nimmt die mittlere Wartezeit je Fahrzeug im Tagesverlauf ab oder bleibt konstant. Im Bereich des Signalzeitenplanes Früh, weist Planfall 3.1 mit 120 s die höchste und Planfall 1.2 mit 70 s die niedrigste mittlere Wartezeit auf. Die Planfälle mit einem speedFactor von 1,0 haben dabei jeweils eine höhere mittlere Wartezeit als bei einem speedFactor von 1,3. Der Unterschied zwischen den beiden Planfällen ist in der Planfallgruppe 1 mit 5 s deutlich geringer als in den Planfallgruppen 2 und 3 mit etwa 35 s. Ab 10:00 Uhr verändert sich das Verhältnis dann deutlich, dann werden die Lichtsignalanlagen durch das Signalprogramm Tag gesteuert. Der Unterschied zwischen den einzelnen Planfällen reduziert sich erheblich. Planfall 2.1 weist mit 40 s die niedrigste Wartezeit auf, die Wartezeit von Planfall 2.2 ist mit 55 s deutlich höher und das Verhältnis umgekehrt. Die Planfälle 1.1 und 1.2 liegen mit mittleren Wartezeiten

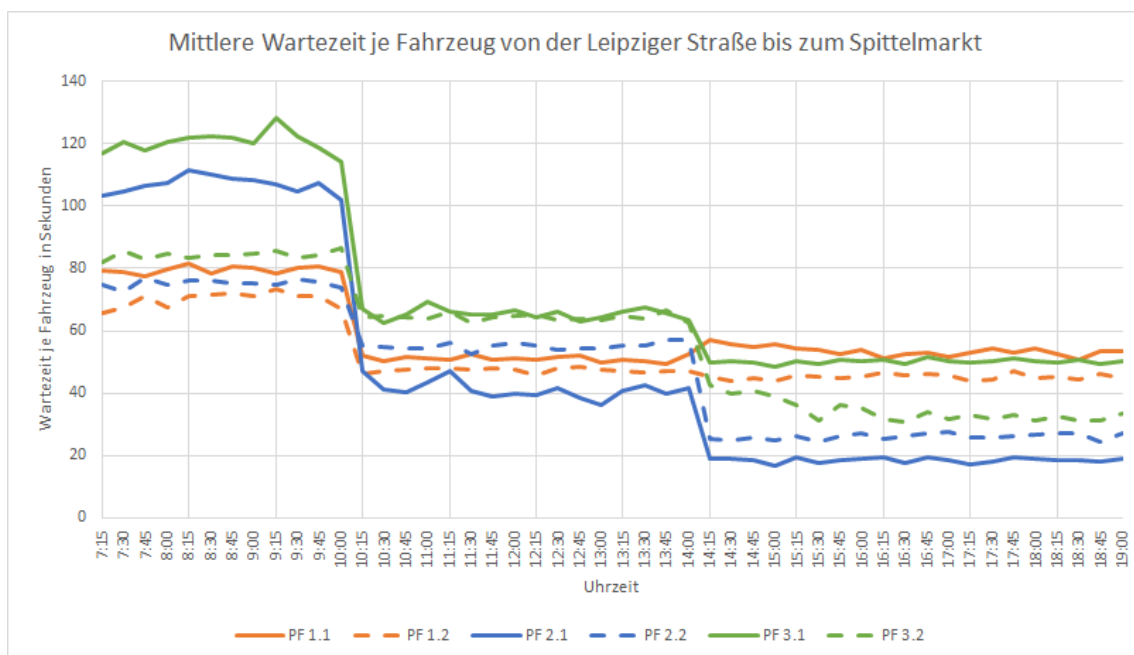


Abbildung 6.7: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²¹

von 50 s und 45 s etwa gleichauf. Auch die Planfälle 3.1 und 3.2 haben mit einer mittleren Wartezeit von 65 s ein ähnliches Niveau. Mit dem Wechsel zum Signalzeitenprogramm

¹²¹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

Spät um 14:00 Uhr senkt sich auch die mittlere Wartezeit erneut ab. Ausnahmen davon bilden nur die Planfälle der Gruppe 1, hier bleibt die mittlere Wartezeit konstant. In der Planfallgruppe 2 reduziert sich die mittlere Wartezeit um etwa 20 s. In der Planfallgruppe 3 reduziert sich die mittlere Wartezeit im Planfall 3.2 mit 26 s deutlich stärker als im Planfall 3.1 mit 12 s. Diese unterschiedlich starken Reduktionen führen dazu, dass sowohl im Planfall 1.1, als auch im Planfall 3.1 ab 14:00 Uhr mit etwa 50 s ähnliche mittlere Wartezeiten je Fahrzeug auftreten.

In Abbildung 6.8 ist dann die mittlere Wartezeit je Fahrzeug in die Gegenrichtung abgetragen, also westwärts. Hier ist das Bild allerdings deutlich differenzierter, wenngleich auch hier die unterschiedlichen Signalzeitenpläne deutlich zum Tragen kommen. Der Verlauf der mittleren Wartezeit ist dabei allerdings umgekehrt, diese steigt im Tagesverlauf an. Dies liegt daran, dass im Signalzeitenplan Früh die Fahrtrichtung Westen und im Signalzeitenplan Spät die Fahrtrichtung Osten maßgebend ist. Die mittleren Wartezeiten sind in Fahrtrichtung Westen aber generell deutlich geringer. Bis 10:00 Uhr treten in allen Planfallgruppen die unterschiedlichen speedFactoren deutlich auf. Wobei die mittlere Wartezeit bei einem speedFactor von 1,3 niedriger ist. Die höchste mittlere Wartezeit tritt im Planfall 2.1 mit circa 60 s auf, die niedrigste im Planfall 3.2 mit etwa 19 s. Der Unterschied in der Planfallgruppe 1 ist mit etwa 24 s am größten. Mit dem Wechsel zum Signalzeitenplan Tag, um 10:00 Uhr, reduziert sich die mittlere Wartezeit in den Planfallgruppen 1 und 2, in der Gruppe 3 steigt diese dagegen an. Die mittlere Wartezeit unterscheidet sich dabei auch in den beiden Planfällen der ersten zwei Gruppen nicht stark. In der Planfallgruppe 1 liegt diese bei 26 s und in der Planfallgruppe 2 bei 48 s. Auch hier ist die Zunahme der Wartezeit um 13:00 Uhr zu verzeichnen. In der Planfallgruppe 3 weist der Planfall 3.1 mit etwa 53 s eine deutlich niedrigere Wartezeit auf als der Planfall 3.2 mit circa 70 s. Dies ist abweichend zum sonstigen Verhalten. Ab dem Wechsel des Signalzeitenplanes um 14:00 Uhr kommt es dann zu einer Zunahme der mittleren Wartezeit. Die Wartezeit der Planfallgruppe 1 liegt bei etwa 35 s, die der Planfallgruppe 3 bei circa 77 s. Zwischen den Planfällen 2.1 und 2.2 kommt es dabei zu Unterschieden in der mittleren Wartezeit. Die Wartezeit von Planfall 2.2 liegt auf dem Niveau der Planfallgruppe 3 und die von Planfall 2.1 ungefähr 15 s darunter.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die mittlere Wartezeit stark von der Uhrzeit, dem angewandten Signalzeitenplan und der Fahrtrichtung abhängt. Der speedFactor hat zwar auch einen Einfluss auf die Wartezeit, ob dieser positiv oder negativ ist hängt allerdings stark von den vorher genannten Parametern ab. Dies liegt daran, dass die Progressionsgeschwindigkeit sich an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit orientiert und diese mit einem höheren speedFactor überschritten wird. Somit kann das durchgehende Grünband nicht optimal genutzt werden.

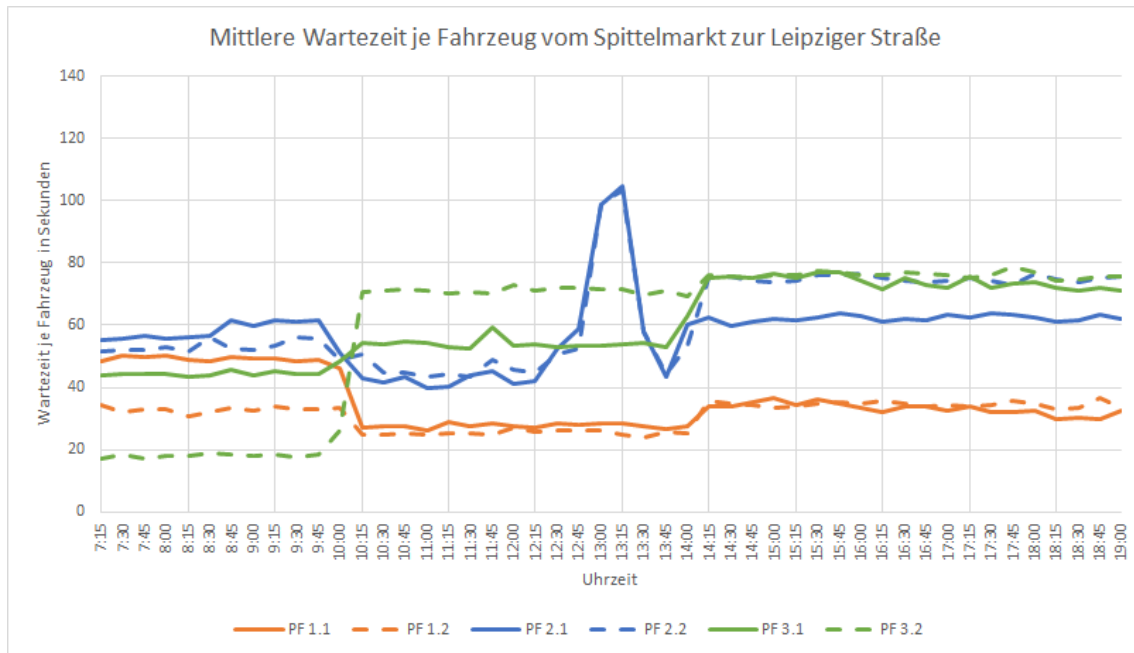


Abbildung 6.8: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²²

6.1.3 Feinstaubemissionen

Die in 15-Minuten-Intervallen aggregierten Feinstaubemissionen sind für die Strecke zwischen KP1 und KP7 in Abbildung 6.9 dargestellt. In den Planfallgruppen 1 und 2 resultiert die erhöhte Geschwindigkeit durch den angepassten speedFactor auch in höheren Emissionen, in der Planfallgruppe 3 ist das nicht so. Gegenläufig zu diesem Trend ist allerdings, dass die Planfallgruppe 1 niedrigere Emissionen als die beiden anderen Gruppen aufweist, trotz der höheren maximal gefahrenen Geschwindigkeit. Generell ist bis 10:00 Uhr ein leichtes Wachstum zu verzeichnen. Anschließend sinken diese leicht ab, in einigen Planfällen nehmen diese auch sprunghaft zu. Bis 13:00 Uhr sind diese dann beinahe konstant und nehmen anschließend kontinuierlich ab.

Im Planfall 1.1 treten durchgehend die niedrigsten Feinstaubemissionen auf. Das Maximum wird zwischen 9:30 Uhr und 9:45 Uhr mit 1,9 g erreicht, das Minimum zwischen 18:45 Uhr und 19:00 Uhr mit 1,1 g. Im Planfall 2.2 werden die höchsten Feinstaubemissionen erreicht. Das Maximum wird zwischen 13:00 Uhr und 13:15 Uhr mit 2,7 g und das Minimum zwischen 18:45 Uhr und 19:00 Uhr mit 1,5 g erreicht. Bemerkenswert ist, dass die Planfälle 3.2 und 1.1 bis 10:00 Uhr nahezu identische Emissionen aufweisen. Danach steigen die Emissionen im Planfall 3.2 allerdings sprunghaft um 0,2 g/15 Min. an und die von Planfall 1.1 fallen um 0,3 g/15 Min. ab. Anschließend liegt der Planfall 3.2 auf einem Niveau mit den Planfällen 2.1 und 3.1 bei knapp über 2 g/15 Min.. Ab 13:00 Uhr

¹²² eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

fallen alle drei Planfälle gemeinsam bis auf etwa 1,3 g/15 Min.. Der Planfall 1.2 liegt etwa 0,2 g/15 Min. über diesem Niveau. Auch wird der Ausreißer in der Planfallgruppe 2 sichtbar, welcher durch Staueffekte entsteht und dadurch zu einer größeren Netzbelastung führt.

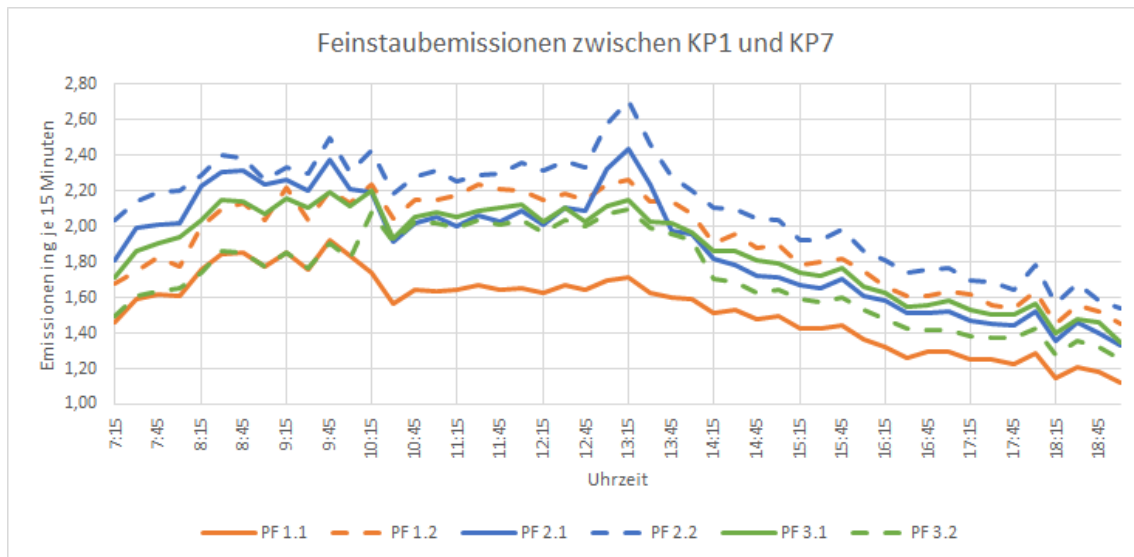


Abbildung 6.9: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²³

Aus dieser Analyse ist festzuhalten, dass eine geringe Geschwindigkeit in diesen Fällen nicht zwangsläufig zu geringeren Feinstaubemissionen führt. Allerdings ist auch keine generelle Erhöhung der Feinstaubemission zu verzeichnen. Da die Planfallgruppe 2 mit einer Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h die höchsten Emissionen aufweist. Die Summen der Feinstaubemissionen der einzelnen Planfälle ist in Tabelle B.1 festgehalten.

In Abbildungen 6.10 ist der Auswertungsraum erneut beschränkt auf den Bereich zwischen KP1 und KP5. Hierbei ergeben sich aufgrund der kürzeren Strecke deutlich geringere Feinstaubemissionen. Der Verlauf der Emissionskurven über den Tag hat sich dabei nur geringfügig geändert. Die Planfälle 1.2, 2.1, 3.1 und 3.2 liegen allerdings ab 10:00 Uhr deutlich dichter beieinander. Der Planfall 1.1 hat niedrigere und der Planfall 2.2 höhere Feinstaubemissionen. Auch der Anstieg am Morgen fällt weniger stark aus, als über die gesamte Strecke von KP1 bis KP7. Aufgrund der kürzeren Strecke sind auch die Feinstaubemissionen geringer. In Planfall 1.1 wird das Maximum in der Zeitscheibe 9:30 Uhr bis 9:45 Uhr mit 1,1 g erreicht, das Minimum im letzten Messzeitraum bis 19:00 Uhr mit 0,6 g. Die Feinstaubemissionen im Planfall 2.2 liegen deutlich drüber, wenngleich das Maximum und das Minimum zum gleichen Zeitpunkt erreicht werden. Das Maximum liegt bei 1,7 g/15 Min. und das Minimum bei 1,0 g/15 Min..

Auch hier ist das Bild bezüglich der Auswirkung der gefahrenen Geschwindigkeit nicht einheitlich. Auch eine Korrelation zu den Wartezeiten ist nicht eindeutig feststellbar.

¹²³ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

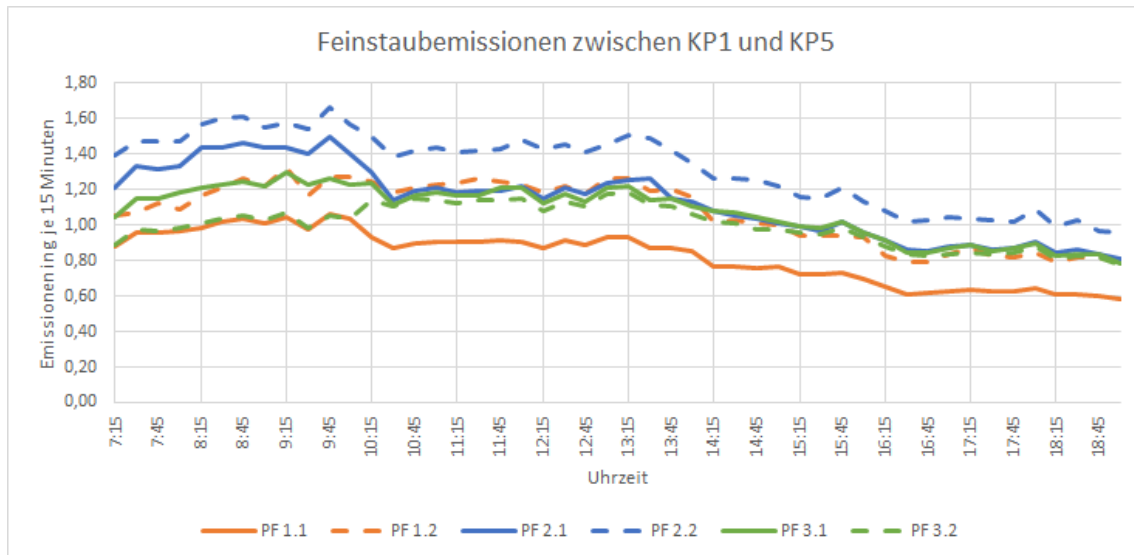


Abbildung 6.10: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²⁴

6.1.4 Stickstoffoxidemissionen

Der Verlauf der Stickstoffoxidemissionen verhält sich anders, als der der Feinstaubemissionen. Für die Strecke zwischen KP1 und KP7 sind diese in Abbildung 6.11 dargestellt. Während vier der sechs Planfälle in einem ähnlichen Emissionsbereich liegen, weisen die Planfälle 1.2 und 2.2 deutlich höhere Stickstoffoxidemissionen auf. Die Planfallgruppe 1 ist in Orange, die 2 in Blau und die 3 in Grün dargestellt. Bis 10:00 Uhr, während der Gültigkeit des Signalzeitenplanes Früh, weisen die Planfälle differenzierte Stickstoffoxidemissionen auf, welche im Verlauf um über 20 g/15 Min. zunehmen. Planfall 3.2 weist mit anfänglichen 74 g/15 Min. die niedrigsten und Planfall 2.1 mit 89 g die höchsten Emissionen innerhalb von 15 Minuten auf. Die Planfälle 1.2 und 2.2 liegen 25 g/15 Min. über dem Niveau von Planfall 2.1. Mit dem Wechsel des Signalzeitenplanes kommt es zu einer Abnahme der Emissionen mit einer gleichzeitigen Verstetigung des Niveaus. Die Planfälle 1.1, 3.1 und 3.2 weisen mit etwa 100 g/15 Min. ein ähnliches Niveau auf. Deutlich darüber liegen weiterhin die Planfälle 1.2 und 2.2, wobei das Niveau von Planfall 1.2 um bis zu 20 g/15 Min. über dem von Planfall 2.2 liegt. Mit dem letzten Wechsel des Signalzeitenplanes beginnen die Stickstoffoxidemissionen abzunehmen, bei gleichzeitig sinkender Verkehrsnachfrage. Dabei liegen die Planfälle 1.1, 2.1, 3.1 und 3.2 erneut dichter zusammen, wobei die Planfallgruppe 3 die niedrigsten Emissionen aufweist. Bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes sinken die Emissionen von Planfall 3.1 auf 58 g/15 Min. ab. Die Planfälle 1.2 und 2.2 liegen weiterhin deutlich über dem Niveau der anderen Planfälle und Planfall 1.2 hat die höchsten Emissionen. Auch bei den Stickstoffoxidemissionen lassen

¹²⁴ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

sich keine eindeutigen Aussagen zu einer Geschwindigkeitsbeeinflussung bei gleichzeitiger Koordinierung ableiten. Alle Planfälle mit einem speedFactor weisen ähnliche Emissionen auf, wobei Planfall 3.1 die niedrigsten und Planfall 2.1 die höchsten aufweist. Durch das Fahren mit einer Geschwindigkeit über der Progressionsgeschwindigkeit steigen die Stickstoffoxidemissionen in zwei Planfällen deutlich an. Im Planfall 3.2 sind dagegen stellenweise Emissionsreduktionen zu verzeichnen.

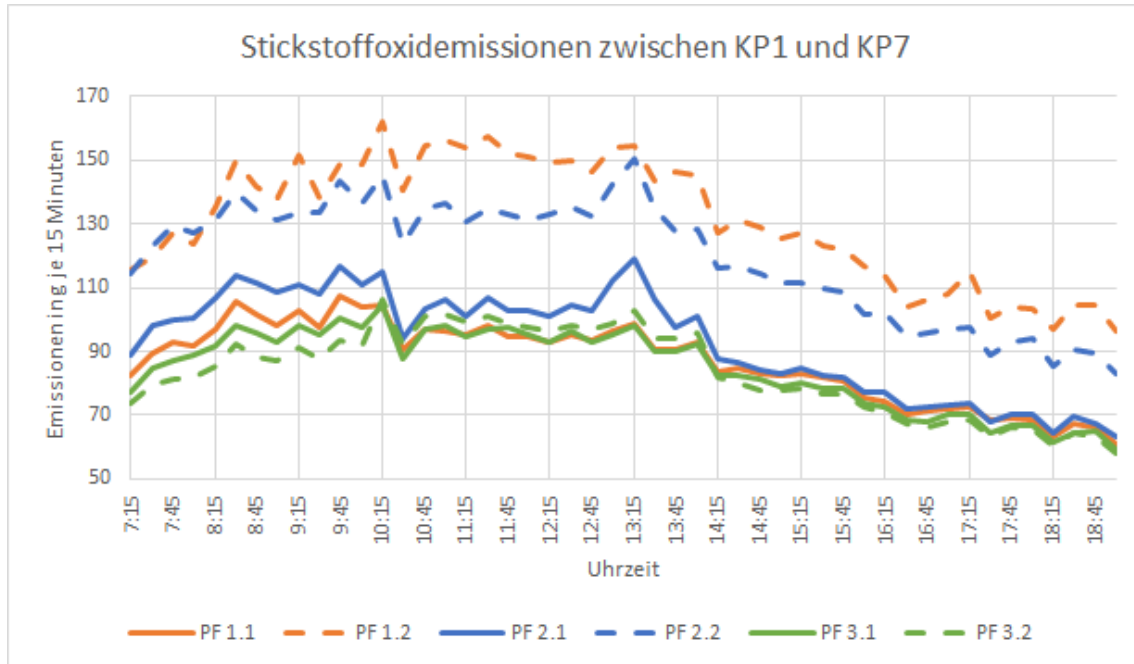


Abbildung 6.11: Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²⁵

Auch in diesem Fall erfolgt eine gesonderte Betrachtung des Abschnittes zwischen KP1 und KP5, diese ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Der Verlauf der Emissionen ändert sich dabei nur geringfügig. Der Anstieg am Morgen fällt schwächer aus. Im Planfall 3.1 lag der Anstieg zwischen 7:00 Uhr und 10:00 Uhr über die gesamte Strecke bei 45 %, wenn die Strecke nur bis KP5 betrachtet wird, liegt dieser bei 32 %. Auch liegen die Planfälle 1.1, 3.1 und 3.2 dichter beieinander. Zwischen den Planfällen 1.2 und 2.2 sind im gesamten Tagesverlauf kaum Unterschiede festzustellen. Während über die gesamte Strecke der Planfall 3.2 die geringsten Stickstoffoxidemissionen aufweist, ändert sich dies bei der verkürzten Betrachtung und Planfall 1.1 weist niedrigere Emissionen auf. Wie bereits über die gesamte Strecke lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang aus einem unterschiedlichen speedFactor oder generell einer höheren Geschwindigkeit herleiten.

¹²⁵ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

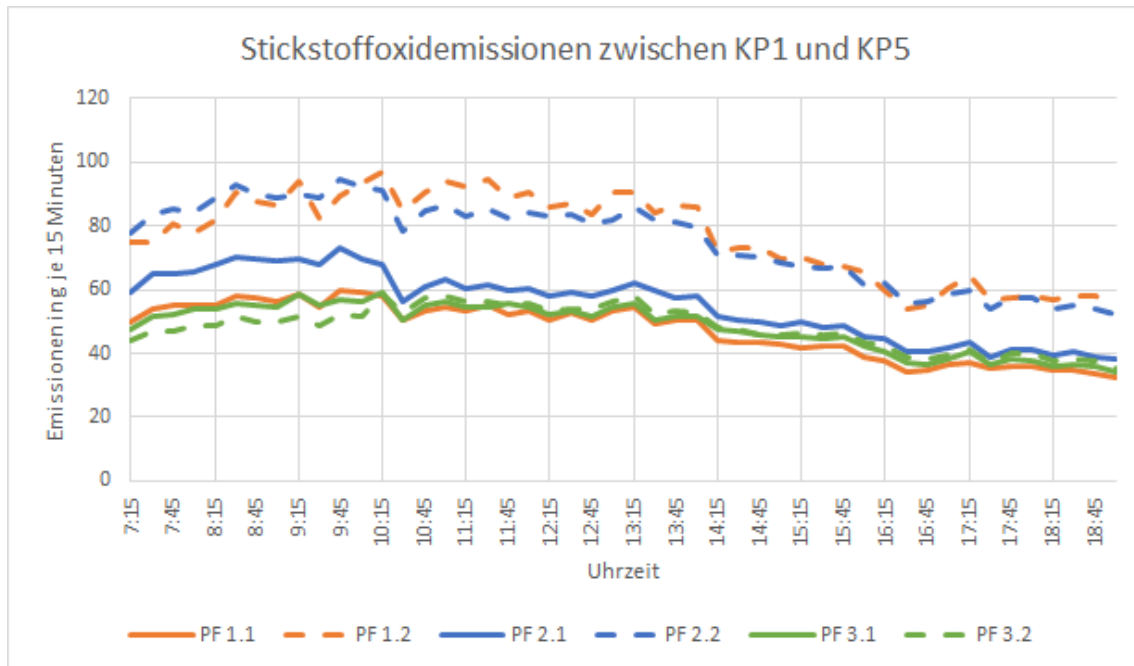


Abbildung 6.12: Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2)¹²⁶

Dies alles zusammenfassend lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Wartezeiten oder Emissionen herstellen, da sich die Wirkungen je nach speedFactor zum Teil erheblich unterscheiden und auch verschiedene Wirkrichtungen aufweisen. Die Planfälle 2.1 und 2.2 haben zum Teil deutlich Abweichungen und sind somit nicht so gut optimiert, wie die anderen Signalprogramme, weisen aber in der Tendenz ein ähnliches Verhalten auf und werden deshalb im Folgenden, wie auch in Kapitel 5.4 angesprochen, nicht weiter behandelt.

6.2 Verkehrsabhängige Steuerung

In diesem Abschnitt wird auf die Unterschiede zwischen einer zeitbasierten Signalsteuerung und einer Festzeitsteuerung eingegangen. Dafür werden die Planfälle 1.3 und 3.3 mit den Planfällen 1.2 und 3.2 verglichen. Die deskriptive Analyse erfolgt dabei größtenteils nur für die beiden erstgenannten, da die anderen beiden bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben worden sind.

¹²⁶ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6.2.1 Geschwindigkeit

In Abbildung 6.13 ist die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 im Tagesgang für diese vier Planfälle abgetragen. Die Planfallgruppe 1 in Orange und die Planfallgruppe 3 in Grün. Diese unterscheiden sich in den Planfällen stark voneinander und mit der verkehrsabhängigen Steuerung werden deutlich geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten erzielt, welche im Tagesverlauf leicht ansteigen. Dies korreliert mit einer sinkenden Verkehrsnachfrage. Die Geschwindigkeit im Planfall 1.3 liegt um bis zu 3,6 m/s niedriger als im Planfall 1.2, die von Planfall 3.3 um bis zu 1,5 m/s niedriger als im Planfall 3.2. Im Tagesverlauf reduzieren sich diese Differenzen geringfügig.

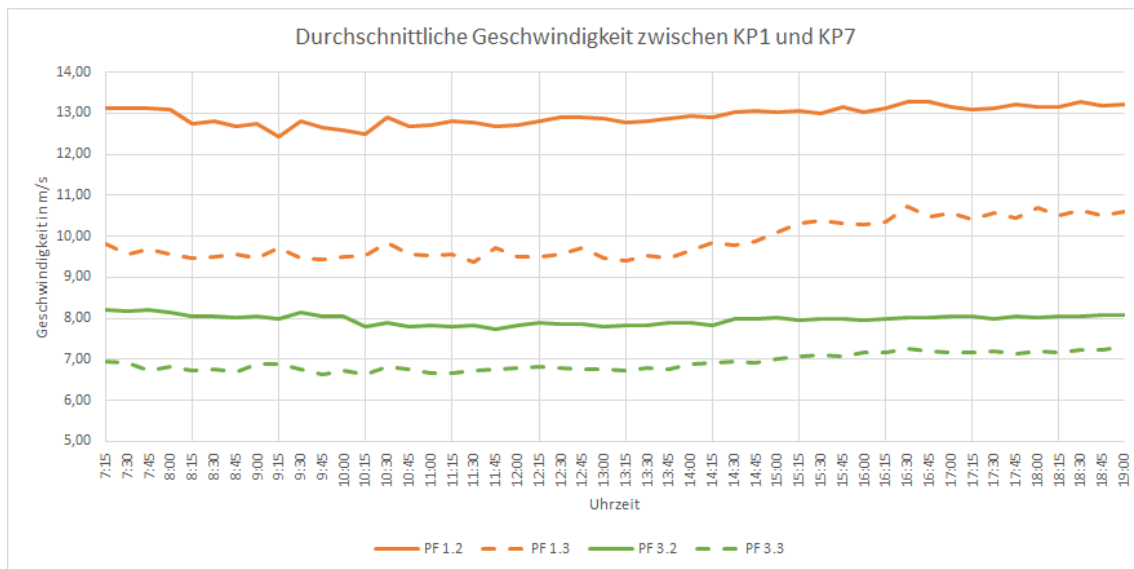


Abbildung 6.13: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹²⁷

Die Geschwindigkeiten der Planfallgruppe liegen allerdings durchgehend über der von Gruppe 3. In Abbildung 6.14 ist die Betrachtung auf den Bereich zwischen KP1 und KP5 beschränkt. Hier fallen die Unterschiede zwischen den beiden verkehrsabhängigen Steuerungen geringer aus, innerhalb der Planfallgruppen vergrößern sie sich jedoch erheblich. Zwischen den Planfällen 1.2 und 1.3 besteht auf diesem Abschnitt eine maximale Geschwindigkeitsdifferenz von 4,9 m/s. Zwischen den Planfällen 3.2 und 3.3 fällt die Zunahme der maximalen Differenz geringer aus und liegt bei 2,0 m/s.

Bei den relativen Geschwindigkeiten zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, siehe hierzu Abbildung 6.15. Während sich die Planfälle 1.2 und 3.2 auf einem ähnlichen Niveau zwischen 0,9 und 1,0 befinden, liegen die Planfälle 1.3 und 3.3 deutlich darunter. Die Planfälle der Gruppe 3 weisen jeweils eine höhere relative Geschwindigkeit auf als ihr Pendant.

¹²⁷ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

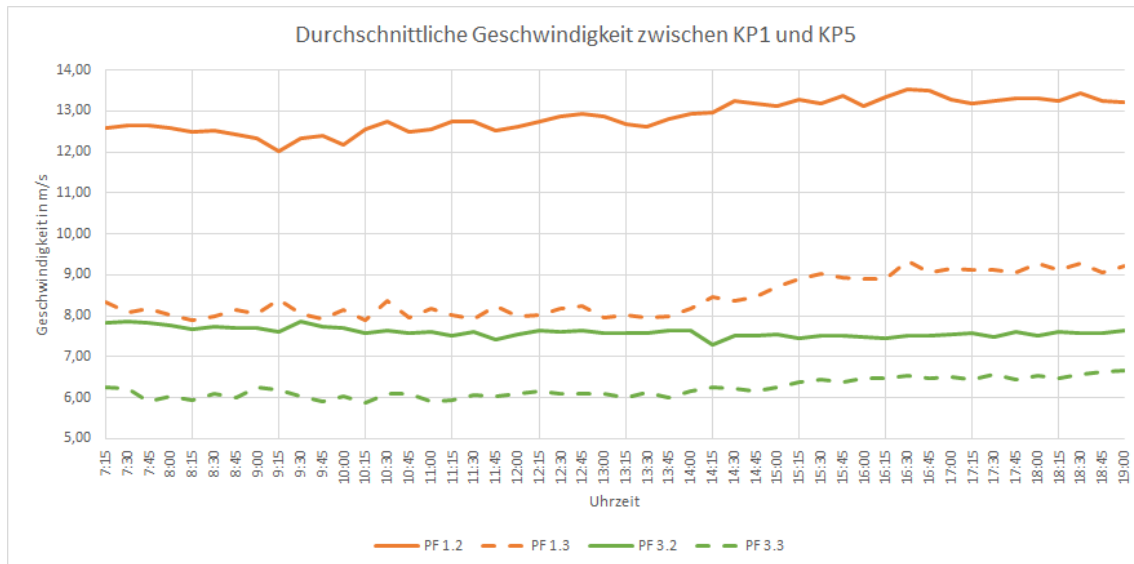


Abbildung 6.14: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹²⁸

Der Planfall 1.3 liegt bis 14:00 Uhr bei einer relativen Geschwindigkeit um 0,7 und steigt dann bis auf 0,76 an. Der Planfall 3.3 liegt bei über 0,8 und steigt ab 14:00 Uhr ebenfalls an und erreicht maximal eine relative Geschwindigkeit von 0,88.

Für die verkürzte Strecke zwischen KP1 und KP5 zeichnet sich ein ähnliches Bild, bei einem geringeren Geschwindigkeitsniveau. Diese sind deshalb in Abbildung 6.16 dargestellt. Die relativen Geschwindigkeiten bei der verkehrsabhängigen Steuerung sind etwa um 0,1 niedriger als über die gesamte Strecke und bleiben in ihrem Verlauf aber ähnlich.

Der Einsatz einer verkehrsabhängigen Steuerung führt also zu einer deutlichen Reduzierung der gefahrenen Geschwindigkeiten. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von nur 30 km/h ist die Reduzierung allerdings deutlich und die Ausnutzung der zulässigen Geschwindigkeit höher.

¹²⁸ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

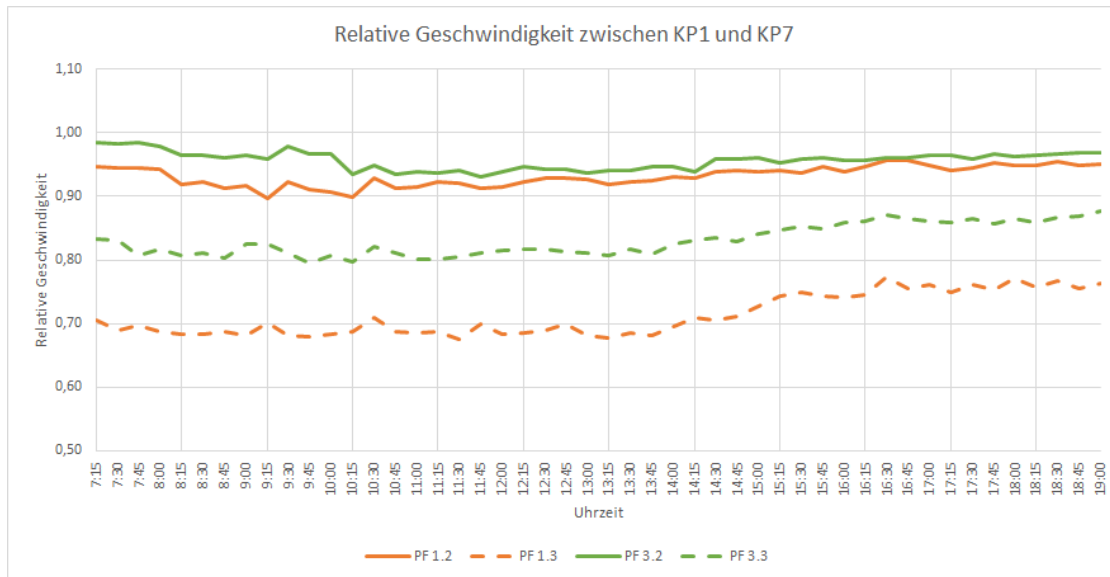


Abbildung 6.15: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹²⁹

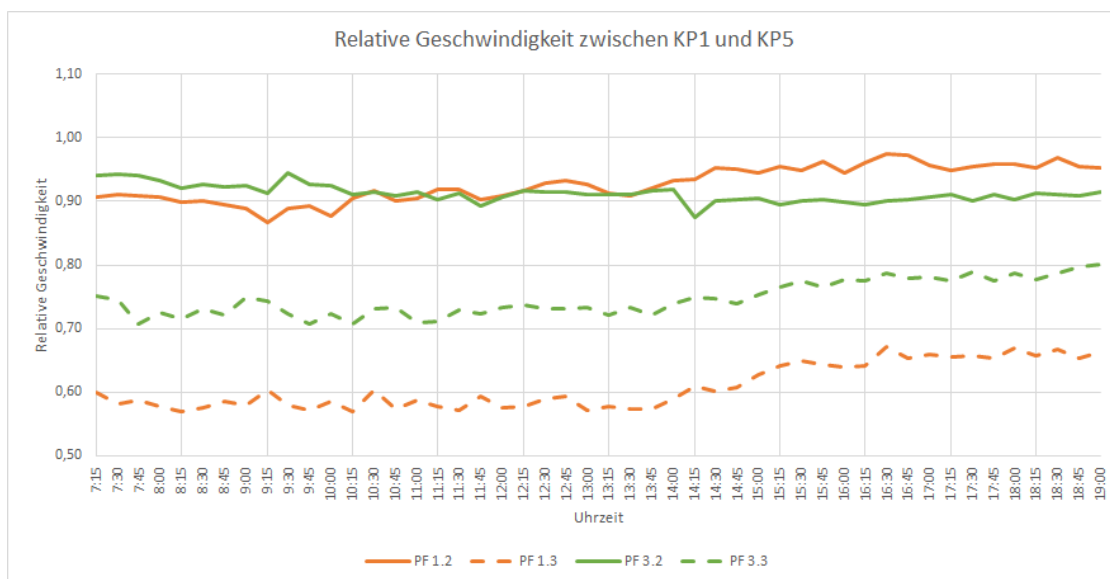


Abbildung 6.16: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁰

¹²⁹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

¹³⁰ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6.2.2 Wartezeit

Die Betrachtung der unterschiedlichen Wartezeiten bei einer verkehrsabhängigen Steuerung findet für die Strecke zwischen KP1 und KP7 in Abbildung 6.17 statt. Für die Planfälle 1.2 und 3.2 ergibt sich das bereits beschriebene Bild, mit einer ähnlichen Wartezeit bis 10:00 Uhr und dann einem deutlichen Unterschied in den Wartezeiten. Da die verkehrsabhängige Steuerung verlustzeitenbasiert ist, ist zu erwarten, dass es auch zu ähnlichen Wartezeiten kommt. Dies ist auch der Fall, die Wartezeiten sind jedoch durchgehend höher als in den festzeitgesteuerten Planfällen, allerdings mit einem ähnlichen Verlauf – Anstieg am Morgen und Sinken am Nachmittag. Insgesamt summieren sich die Wartezeiten in Planfall 1.3 auf 548,7 Stunden und in Planfall 3.3 auf 567,43 Stunden, siehe dazu Tabelle B.2.

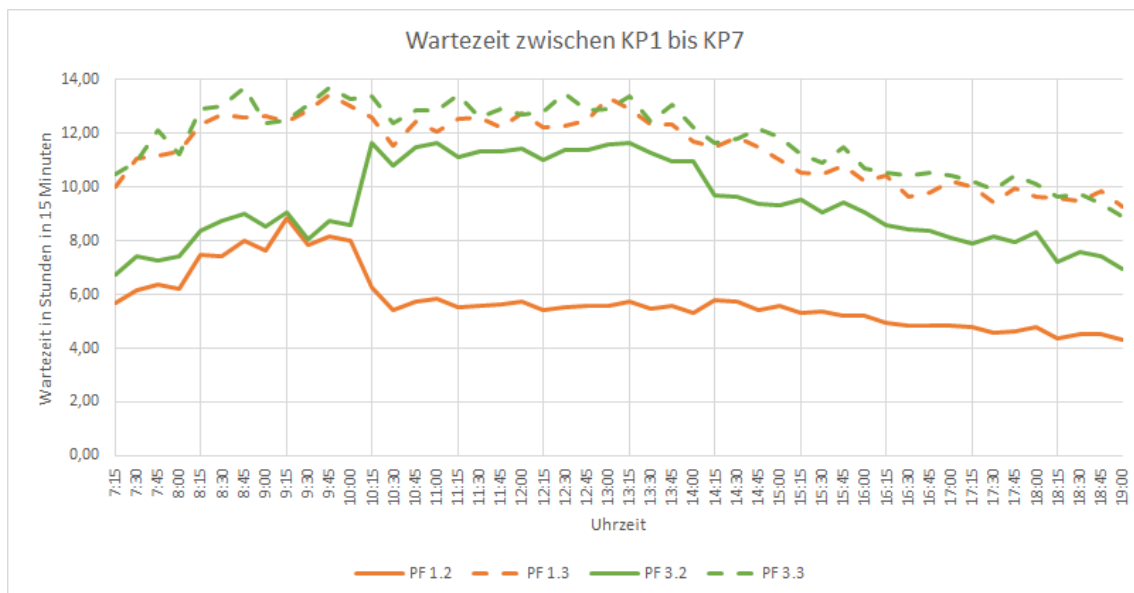


Abbildung 6.17: Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³¹

Für die Strecke zwischen KP1 und KP5 ergibt sich ein ähnliches Bild, dieses ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Dabei reduziert sich der Unterschied zwischen den beiden verkehrsabhängig gesteuerten Planfällen und Planfall 3.2 im Tagesverlauf deutlich, sodass der Planfall 1.3 in einigen Messintervallen geringere Wartezeiten aufweist. Auch auf diesem Abschnitt weist der Planfall 3.3 geringfügig höhere Gesamtwartezeiten als der Planfall 1.3 auf.

Auch die Betrachtung der mittleren richtungsbezogenen Wartezeit für die Durchfahrung des Netzes in der gesamten Ausdehnung führt zu der Erkenntnis, dass zwischen den beiden verkehrsabhängigen Steuerungen keine signifikanten Unterschiede existieren. In Fahrtrichtung Osten (Abbildung 6.19) liegen die mittleren Wartezeiten der Planfälle 1.3,

¹³¹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

3.2 und 3.3 bis 10:00 Uhr morgens zwischen 80 s und 95 s. Die mittlere Wartezeit von Planfall 3.2 fällt anschließend deutlich, während diese in den anderen Planfällen nahezu konstant bleibt. Der bei der Betrachtung der Gesamtwartezeit festzustellende Effekt, dass die Wartezeit im Verlauf des Tages abnimmt, ist in keinem der Planfälle festzustellen und liegt damit in der Verkehrsnachfrage begründet, wobei die geringere Verkehrsnachfrage nicht zu einer nennenswerten Verkehrsverflüssigung beiträgt.

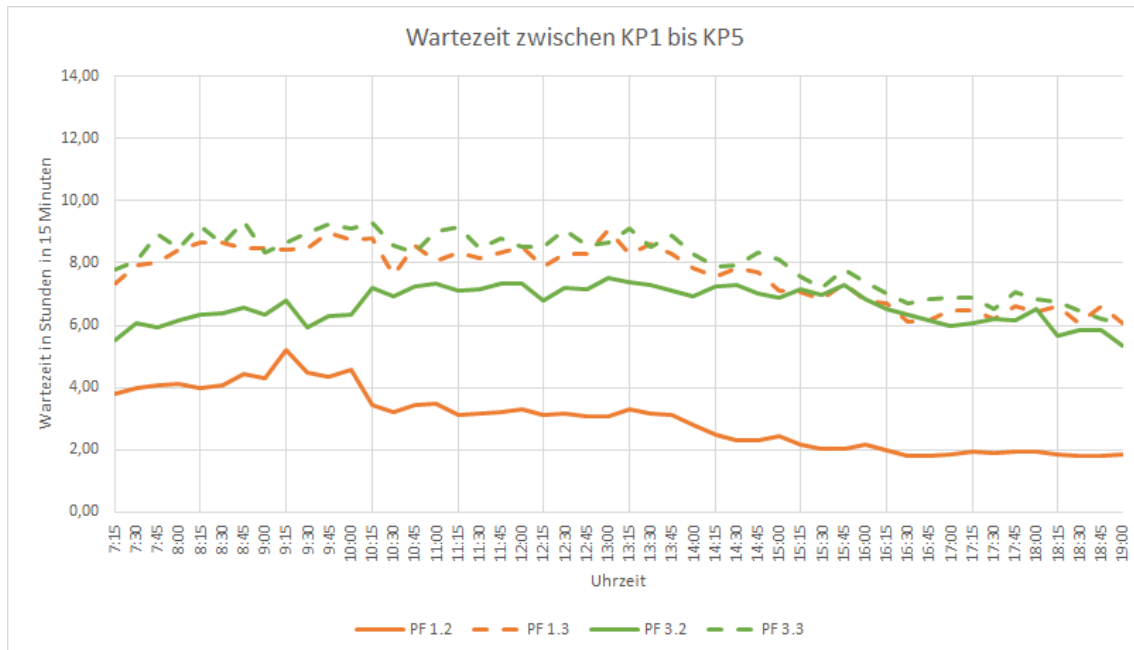


Abbildung 6.18: Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³²

In die entgegengesetzte Richtung ist ein ähnliches Verhalten feststellbar, siehe Abbildung 6.20. Die Wartezeit der Planfälle 1.3 und 3.3 liegt hier zwischen 56 s und 73 s mit starken Schwankungen in diesem Bereich. Damit liegt die Wartezeit im morgendlichen Bereich deutlich über den beiden Planfällen 1.2 (33 s) und 3.2 (19 s). Aufgrund des sprunghaften Anstiegs der mittleren Wartezeit in Planfall 3.2 auf über 70 s aufgrund des Wechsels des Signalzeitenplanes, weist nun dieser bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes die höchste Wartezeit auf.

Die Betrachtung der verkehrsabhängigen Steuerung im Vergleich zur zeitabhängigen Steuerung führt zu der Erkenntnis, dass in der verkehrsabhängigen Steuerung höhere Wartezeiten auftreten, welche allerdings nicht geschwindigkeitsabhängig sind, sodass anzunehmen ist, dass auch bei einer zeitabhängigen Steuerung die Differenz der Wartezeiten bei den verschiedenen zulässigen Geschwindigkeiten reduziert werden könnte.

¹³² eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

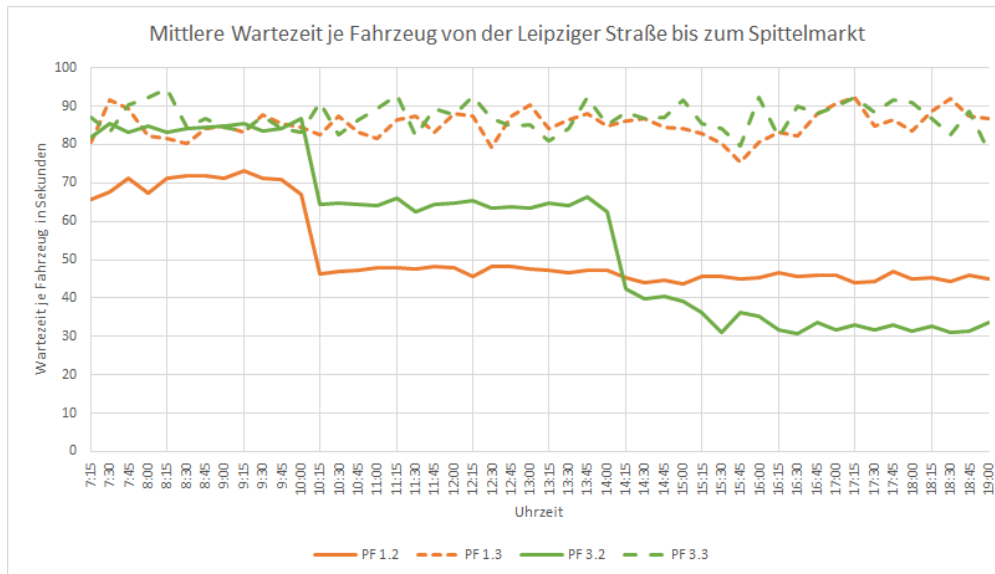


Abbildung 6.19: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³³

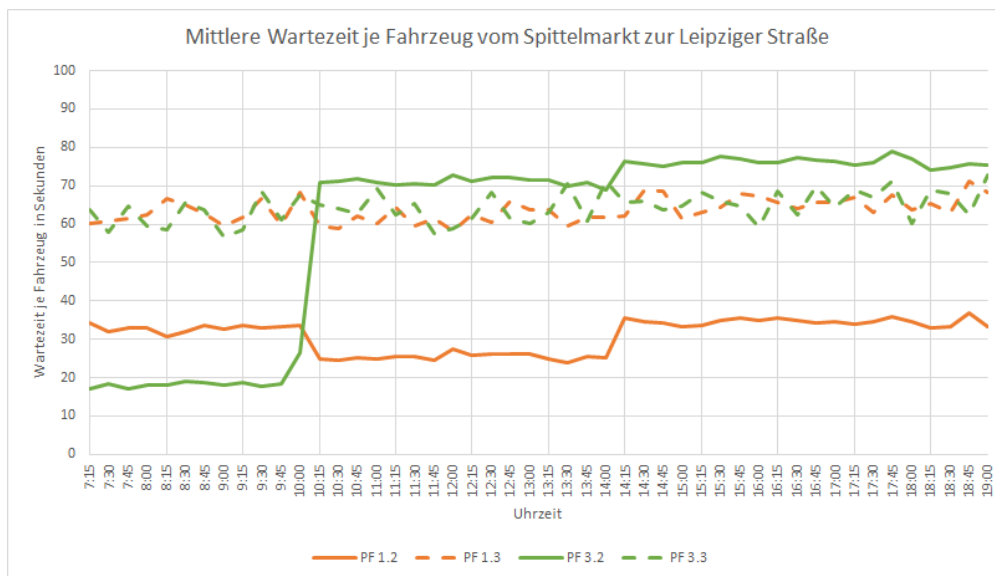


Abbildung 6.20: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁴

¹³³ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

¹³⁴ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6.2.3 Feinstaubemissionen

Die Feinstaubemissionen für die Strecke zwischen KP1 und KP7 werden in Abbildung 6.21 betrachtet. Wie auch bei den Wartezeiten ist festzustellen, dass die Emissionen bei einer verkehrsabhängigen Steuerung höher sind. Bei den Feinstaubemissionen ist allerdings ein deutlicher Unterschied zwischen den Planfällen 1.3 und 3.3 festzustellen. Während Planfall 3.3 eine im Median um 0,4 g höhere Emissionen als der Planfall 3.2 aufweist, liegt der Unterschied zwischen 1.3 und 1.2 bei 1,1 g. Damit entstehen im Planfall 1.3 56 % höhere Emissionen als im Planfall 1.2., in der Planfallgruppe 3 nehmen die Emissionen nur um 23 % zu. Der Verlauf der Feinstaubemissionskurve ist aber in allen Planfällen ähnlich. Mit diesen hohen Emissionen weist der Planfall 1.3 zudem die höchsten Emissionen aller Planfälle auf.

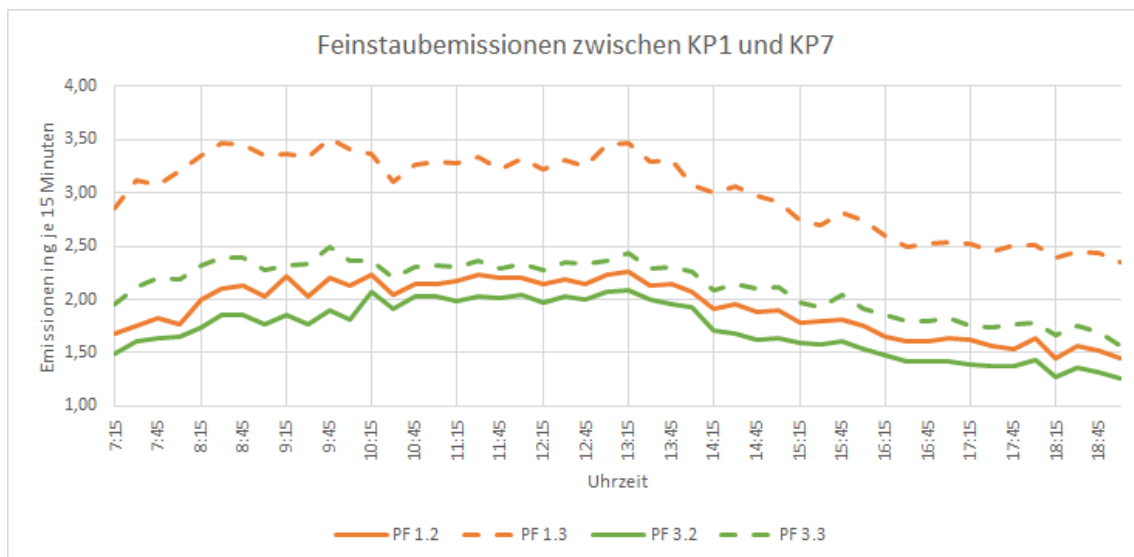


Abbildung 6.21: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁵

Wenn dagegen nur die Strecke zwischen KP1 und KP5 betrachtet wird, wie in Abbildung 6.22, fallen die absoluten Emissionen geringer aus. Aber der relative Unterschied zwischen Planfall 1.2 und 1.3 vergrößert sich deutlich. So liegt der Median des Abstandes bei 1,0 g und damit nur unwesentlich unter dem für die gesamte Strecke. Aufgrund der insgesamt geringeren Emissionen unterscheiden sich die Feinstaubemissionen für den gesamten Untersuchungszeitraum um den Faktor 1,93. In der Planfallgruppe 3 steigt dieser Faktor wesentlich weniger stark auf 1,31 an.

¹³⁵ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

Die Feinstaubemissionen unterscheiden sich zwischen den beiden verkehrsabhängigen Steuerungen erheblich, wobei es besonders im Planfall 1.3 zu erhöhten Emissionen kommt, diese treten vor allem zwischen den KP1 und KP5 auf. Dies liegt wahrscheinlich an der fehlenden durchgehenden Koordinierung und somit einem höheren Anteil an Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, siehe dazu Kapitel 6.4.

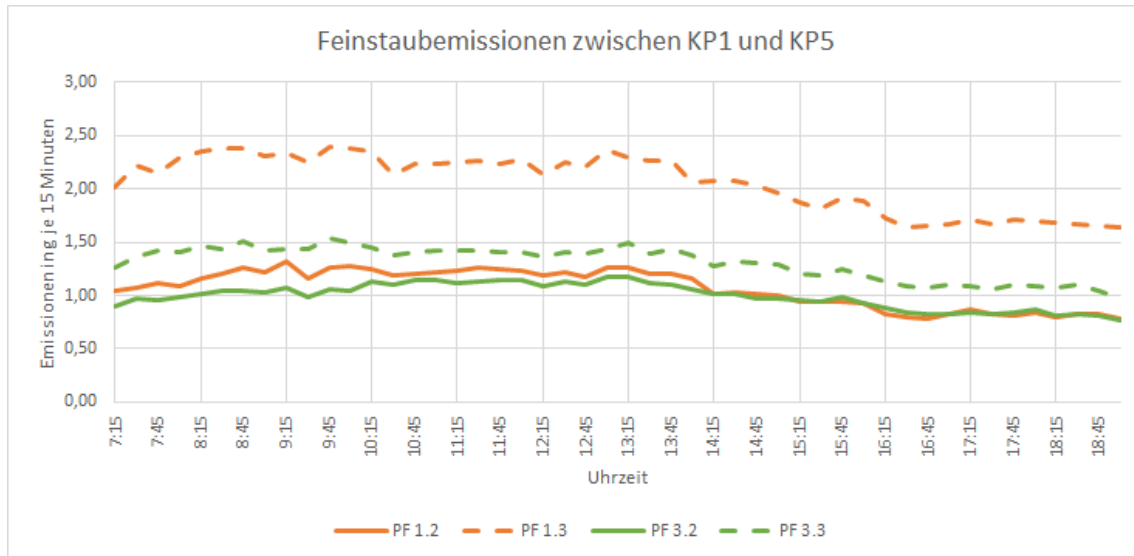


Abbildung 6.22: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁶

6.2.4 Stickstoffoxidemissionen

Abschließend wird noch auf die Stickstoffoxidemissionen eingegangen. Die in Abbildung 6.23 dargestellten Emissionen beziehen sich auf die Strecke zwischen KP1 und KP7. Hierbei ist festzustellen, dass die Emissionen der Planfallgruppe 1 durchgehend höher sind als die der Planfallgruppe 3. Wie auch bei den anderen Betrachtungen ist bis 10:00 Uhr eine Zunahme der Emissionen zu verzeichnen, dann ein konstantes Niveau und anschließend eine Abnahme auf den geringsten Wert des Tages. Für den Planfall 3.2 stellt sich das wie folgt dar: 73,7 g/15 Min. zu Beginn, als Maximum 106,3 g/15 Min. und anschließendes Absinken auf 58,4 g/15 Min.. Der Planfall 3.3 liegt mit 95,3 g/15 Min., 121,8 g/15 Min. und 72,1 g/15 Min. im Median 16,8 g darüber. Der Planfall 1.2 liegt im Median weitere 29,2 g darüber. Der Abstand ist dabei vor allem zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr größer. Der Planfall 1.3 weist dann die absolut höchsten Emissionen auf, die entsprechenden Werte sind: 203,8 g/15 Min., 230,5 g/15 Min. und 145,4 g/15 Min.. Der Median des Abstandes zwischen Planfall 1.2 und Planfall 1.3 liegt somit bei 62,5 g. In der verkehrsabhängigen Steuerung des Planfalles 1.3 treten somit deutlich höhere Stickstoffoxidemissionen als in allen anderen Planfällen.

¹³⁶ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

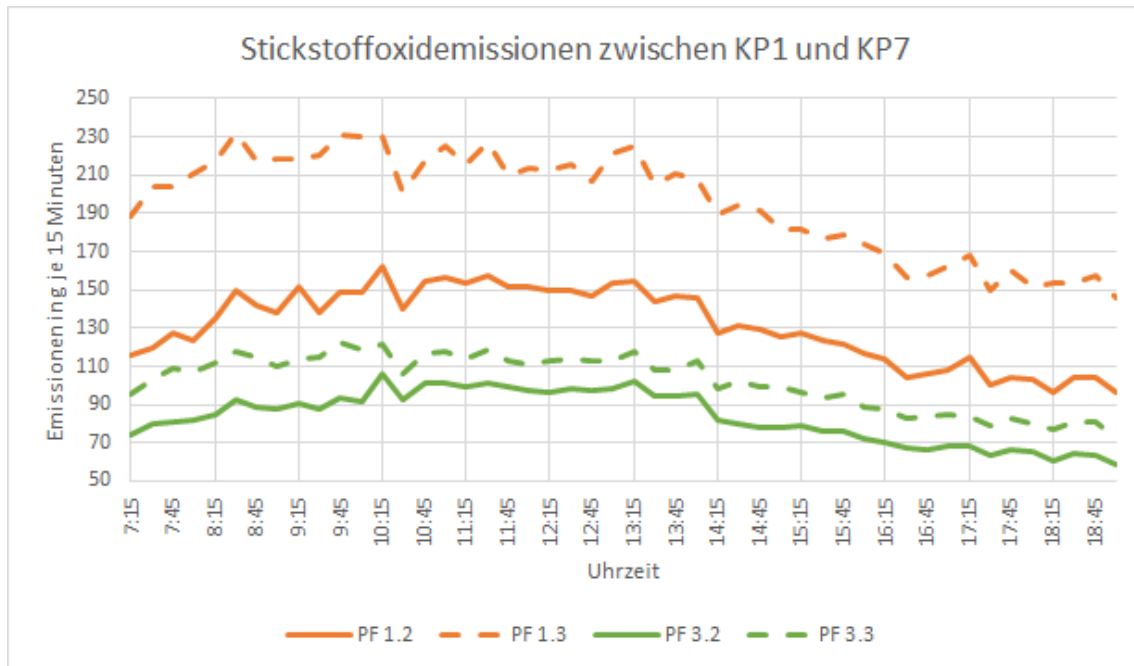


Abbildung 6.23: Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁷

Auch wenn die Betrachtungsstrecke wie in Abbildung 6.24 auf den Bereich zwischen KP1 und KP5 verkürzt wird, ändert sich nichts an den deutlich erhöhten Emissionen des Planfalles 1.3. Während die anderen drei Planfälle in einer Spannweite von etwa 40 g liegen, liegt dieser Planfall im Median 58,6 g über dem Planfall mit den zweithöchsten Emissionen.

Auch bei der Betrachtung der Stickstoffoxidemissionen ist festzuhalten, dass die Emissionen durch die verkehrsabhängige Steuerung steigen, diese Steigerung fällt aber bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h signifikant geringer aus als bei 50 km/h.

In der Zusammenfassung zur verkehrsabhängigen Steuerung kann man feststellen, dass es durch diese zu keiner Verbesserung hinsichtlich eines Parameters kam. Vor allem bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung der Auswertungsparameter. Eine auf einzelne Knotenpunkte optimierte verkehrsabhängige Steuerung funktioniert in diesem Fall also wesentlich schlechter, als eine Steuerung, welche netzweit koordiniert ist, und somit ein möglichst konstantes Fahren des Kfz-Verkehrs über das gesamte Netz ermöglicht.

¹³⁷ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

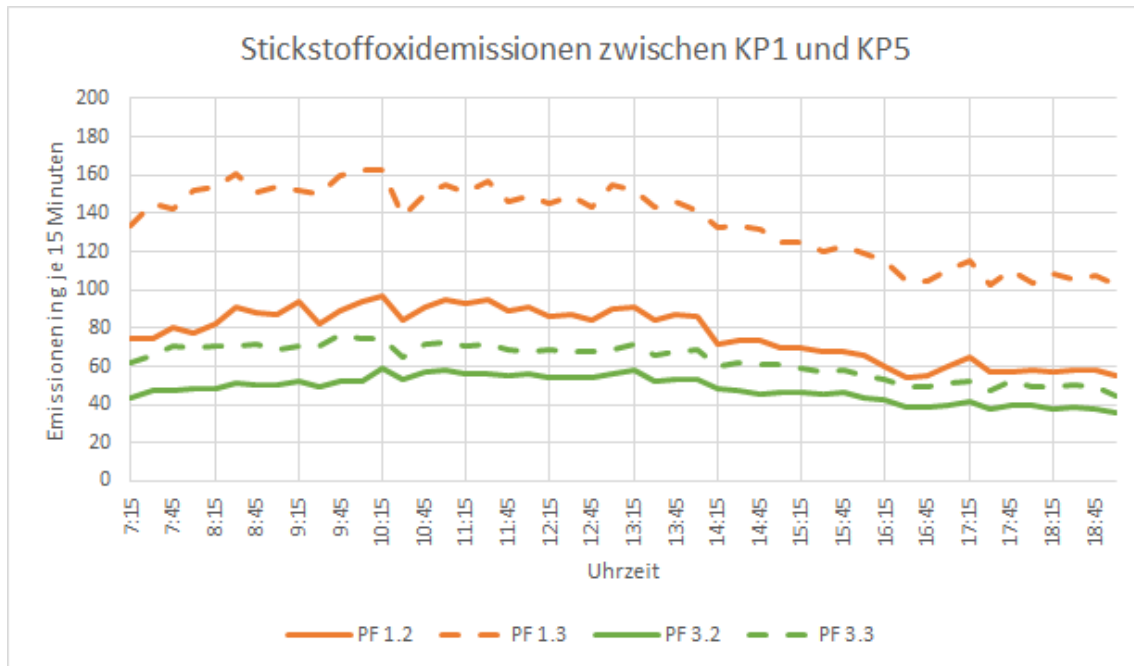


Abbildung 6.24: Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.2, 1.3, 3.2 und 3.3)¹³⁸

6.3 Signalzeitenpläne

In diesem Abschnitt wird näher auf die Unterschiede zwischen den einzelnen Signalzeitenplänen eingegangen. Wie bereits angesprochen, gibt es teilweise deutliche Unterschiede bei den Wartezeiten und den Emissionen zwischen den einzelnen Signalzeitenplänen, welche sich nicht durch eine sprunghafte Veränderung der Verkehrsnachfrage erklären lassen. Aus diesem Grund erfolgt hier eine vergleichende Betrachtung der Signalzeitenpläne.

6.3.1 Geschwindigkeit

In Abbildung 6.25 ist die durchschnittliche Geschwindigkeit im Tagesverlauf zwischen KP1 und KP7 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Planfallgruppen 1 (orange) und 3 (grün), welche aufgrund der unterschiedlichen erlaubten maximalen Geschwindigkeit entstehen.

Bei den Planfällen der Gruppe 3 ist der Signalzeitenplan Früh im gesamten Zeitraum der, welcher die höchsten Geschwindigkeiten realisiert. Die Planfälle 3.5 und 3.6 weisen eine nahezu identische durchschnittliche Geschwindigkeit auf. Der Unterschied zwischen dem

¹³⁸ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

Planfall 3.4 und 3.5 liegt bei etwa 0,3 m/s. Bei allen drei Planfällen steigt die Geschwindigkeit im Tagesverlauf leicht an. Die durchschnittliche Geschwindigkeit im Planfall 3.4 liegt zwischen 8,0 m/s und 8,4 m/s. Aus Geschwindigkeitssicht wäre hiermit der Frühplan im gesamten Tagesverlauf zu bevorzugen.

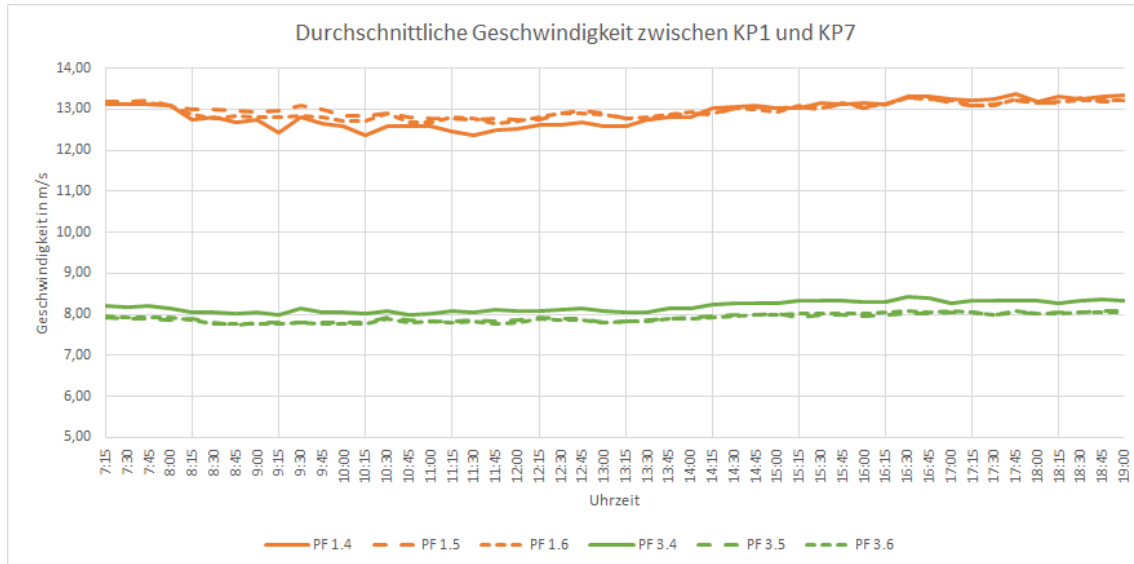


Abbildung 6.25: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹³⁹

Bei den Planfällen der Gruppe 1 ist über die Strecke zwischen KP1 und KP7 kein eindeutiger Unterschied zwischen den Planfällen über den gesamten Tagesverlauf festzustellen. Auch hier gibt es bei allen Planfällen eine leichte Geschwindigkeitszunahme im Tagesverlauf. Die Geschwindigkeitsspannweite erstreckt sich für alle drei Planfälle von 12,4 m/s bis zu 13,4 m/s. Aus diesem Grund wird in Abbildung 6.26 der Abschnitt zwischen KP1 und KP5 speziell betrachtet. Hierbei ist der Unterschied zwischen allen Planfällen eindeutig. Bei der Planfallgruppe 1 weist im gesamten Tagesverlauf der Planfall 1.5 die höchste und Planfall 1.3 die niedrigste durchschnittliche Geschwindigkeit auf. Der Signalzeitenplan Spät ermöglicht also im gesamten Tagesverlauf die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei der Planfallgruppe 3 vergrößern sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Planfällen. Planfall 3.4 weist die höchste und Planfall 3.5 die niedrigste Durchschnittsgeschwindigkeit auf. Hier ermöglicht also der Signalzeitenplan Früh das zügigste Fahren. In allen sechs Planfällen bleibt die Zunahme der Durchschnittsgeschwindigkeit im Tagesverlauf erhalten. Dies korreliert mit der in Abbildung 5.4 dargestellten abnehmenden Verkehrsnachfrage.

¹³⁹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

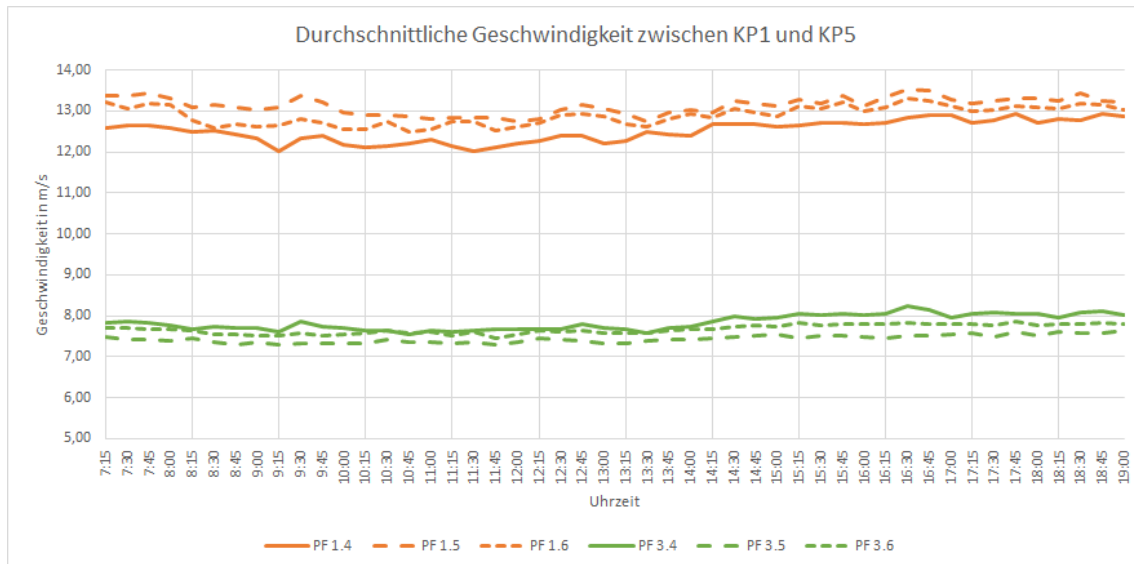


Abbildung 6.26: Durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁰

In Abbildung 6.27 ist die gefahrene Geschwindigkeit in Bezug auf die maximale Geschwindigkeit dargestellt. Bei allen betrachteten Planfällen liegt die relative Geschwindigkeit zwischen 0,89 und 1,01. Die Planfälle der Gruppe 3 weisen dabei zumeist eine höhere relative Geschwindigkeit und Planfall 3.4 die höchste auf. Dies liegt in einigen 15-Minuten-Intervallen über 1,0, also der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Dies ist in der Verwendung des speedFactors von 1,3 begründet und deutet auf eine relativ freie mögliche Geschwindigkeitswahl hin.

Im Bereich der kürzeren Knotenpunktabstände zwischen KP1 und KP5 ist die Unterscheidung zwischen den einzelnen Planfallgruppen weniger eindeutig und es wird deutlich, dass das Geschwindigkeitsniveau mit einer Spannweite von 0,88 bis 0,99 generell etwas geringer ist. Dies ist in Abbildung 6.28 dargestellt.

Um eine möglichst hohe durchschnittliche Geschwindigkeit zu erreichen, wäre eine Anpassung der vorhandenen Steuerung in Planfallgruppe 3 sinnvoll, sodass hier durchgehend der Signalzeitenplan Früh gilt, also Planfall 3.4. In der Planfallgruppe 1 kann ein zeitabhängiger Wechsel sinnvoll sein, im Bereich zwischen KP1 und KP5 werden allerdings mit den Signalzeitenplan Spät die höchsten durchschnittlichen Geschwindigkeiten erzielt.

¹⁴⁰ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

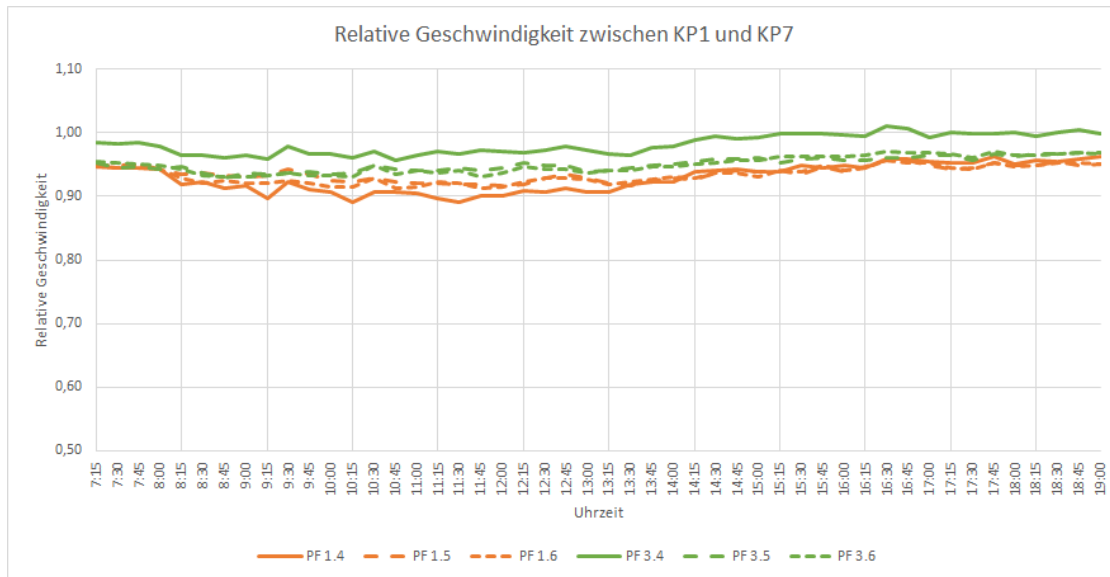


Abbildung 6.27: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴¹

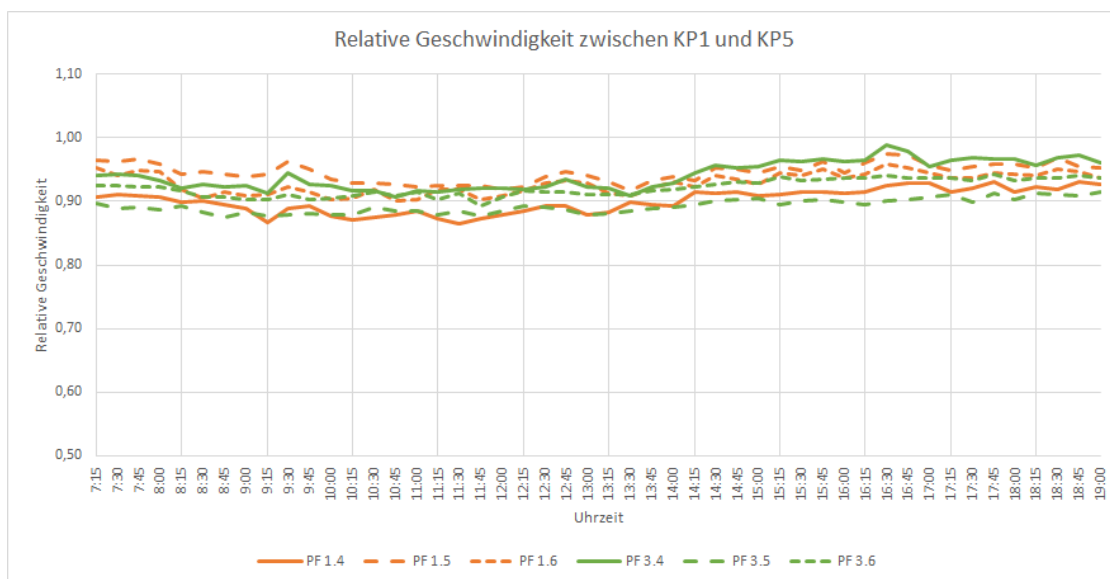


Abbildung 6.28: Relative Geschwindigkeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴²

¹⁴¹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

¹⁴² eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6.3.2 Wartezeit

Wie bereits im Abschnitt 6.1.2 angesprochen, wirken sich die unterschiedlichen Signalzeitenpläne unterschiedlich stark auf die Wartezeiten des Verkehrs aus. In Abbildung 6.29 ist die Wartezeit über die gesamte Strecke abgebildet. Dort werden die Unterschiede zwischen den Signalsteuerungen deutlich sichtbar. Dabei wird eine klare Rangfolge zwischen den Planfällen sichtbar. Die beiden Planfälle mit der Signalsteuerung Früh (1.4 (orange) und 3.4 (grün)) weisen im gesamten Tagesgang einen ähnlichen Wartezeitenverlauf auf. Dies hat sich bereits in Abbildung 6.5 angedeutet, aufgrund des Signalplanwechsels allerdings nur bis 10:00 Uhr sichtbar. Die Wartezeiten der Planfälle 3.5 und 3.6 sind höher, die der Planfälle 1.5 und 1.6 niedriger. Ab 14:00 Uhr nähern sich dabei alle Planfälle der Gruppe 1 einander mit ihren Wartezeiten an.

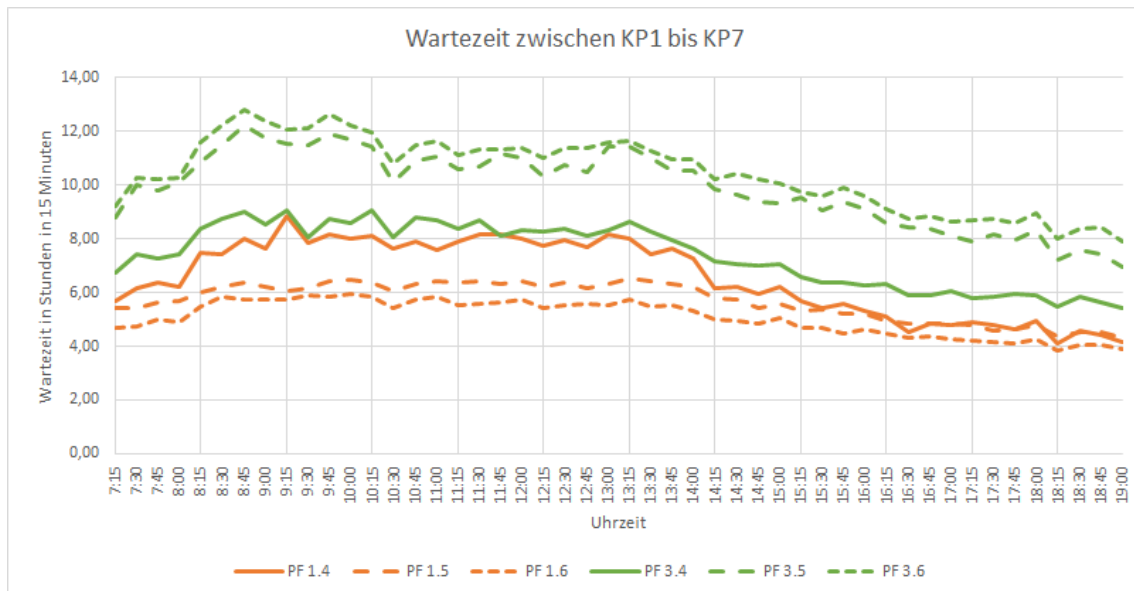


Abbildung 6.29: Wartezeit zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴³

In Abbildung 6.30 ist nur die Wartezeit zwischen KP1 und KP5 abgetragen, hierbei verändert sich die Rangordnung der unterschiedlichen Planfälle, auch die Unterschiede der beiden Planfallgruppen werden deutlicher. Die Planfallgruppe 1 weist auf diesem Abschnitt deutlich niedrigere Wartezeiten auf, wobei die geringsten diesmal in Planfall 1.5 auftreten. In der Planfallgruppe 3 treten die höchsten Wartezeiten nun im Planfall 3.5 auf.

Wie aus den abgebildeten Verläufen sichtbar wird, ist im Sinne der Gesamtwartezeit über die gesamte Strecke in der Planfallgruppe 1 der Signalzeitenplan Tag (Planfall 1.6) und in der Planfallgruppe 3 der Signalzeitenplan Früh (Planfall 3.4) für den gesamten Tag zu bevorzugen. Abweichend davon weist der Signalzeitenplan Spät im Planfall 1.5 auf der verkürzten Strecke bis KP5 geringere Wartezeiten als der Planfall 1.6 auf.

¹⁴³ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

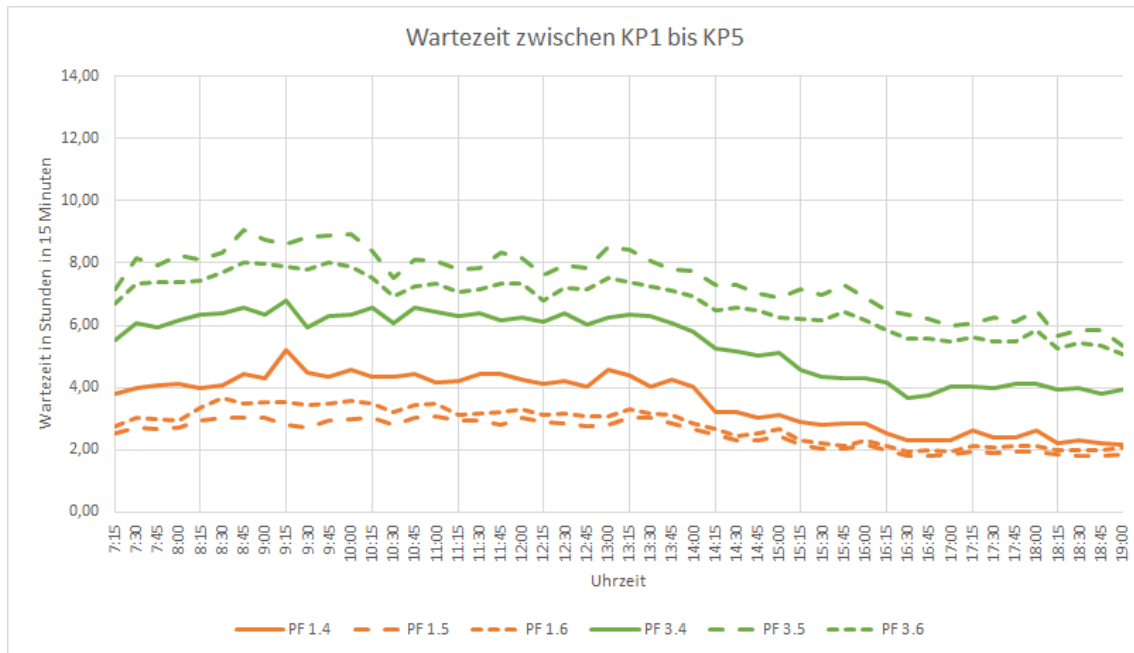


Abbildung 6.30: Wartezeit zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁴

In den Abbildungen 6.31 und 6.32 sind die mittleren Wartezeiten je Fahrzeug nach ihrer Fahrtrichtung getrennt angegeben. Die mittlere Wartezeit bezieht sich dabei nur auf Fahrzeuge, welche die gesamte Strecke passiert haben. In Fahrtrichtung Ost weist der Planfall 3.4 mit über 80 s die höchste mittlere Wartezeit auf. In die entgegengesetzte Richtung mit unter 20 s weist dieser die niedrigste Wartezeit aller sechs Planfälle. Hier wird die priorisierte Fahrtrichtung sehr deutlich. Der Planfall 3.5 verhält sich diametral dazu und weist in Fahrtrichtung Ost mit 31 s bis 43 s die niedrigste und in Fahrtrichtung West mit fast 80 s die höchste mittlere Wartezeit auf. Dies entspricht der Umkehr der Lastrichtung zwischen den Signalzeitenplänen Früh (Planfall 3.4) und Spät (Planfall 3.5). Die Veränderungen im Planfall 3.6, welcher mit dem Signalzeitenplan Tag gesteuert wird, fallen mit 70 s und 65 s deutlich geringer aus. Hier existiert keine vorherrschende Lastrichtung.

In der Planfallgruppe 1 sind die Unterschiede zwischen den Fahrtrichtungen und Tageszeiten geringer. Im Planfall 1.4 liegt die maximale mittlere Wartezeit bei 73 s, diese sinkt im Tagesverlauf auf bis zu 50 s ab. In die der Gegenrichtung liegt diese dagegen konstant bei um die 30 s. Der Planfall 1.5 weist in Fahrtrichtung Westen mit 35 s eine höhere Wartezeit auf als der Planfall 1.4, in Fahrtrichtung Osten ist dies dann umgekehrt, ist mit 45 s dennoch höher als in der Gegenrichtung. Der Planfall 1.6 mit dem Signalzeitenplan Tag ordnet sich nicht wie der Planfall 3.6 zwischen den beiden anderen Signalsteuerungen ein, sondern liegt in Fahrtrichtung Ost leicht über dem Planfall 1.5 und hat in Richtung Westen mit 25 s die niedrigste mittlere Wartezeit der Planfallgruppe 1.

¹⁴⁴ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

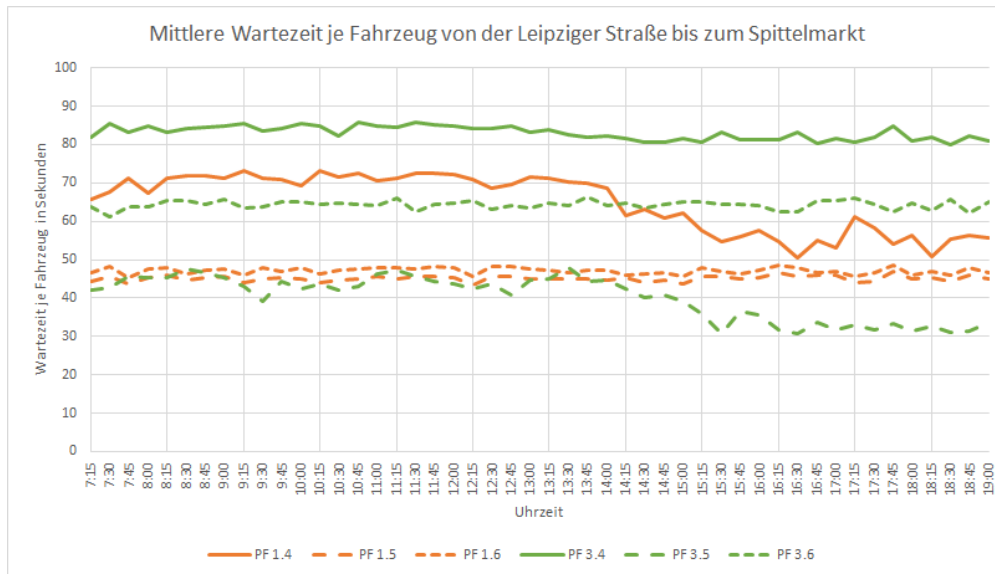


Abbildung 6.31: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁵

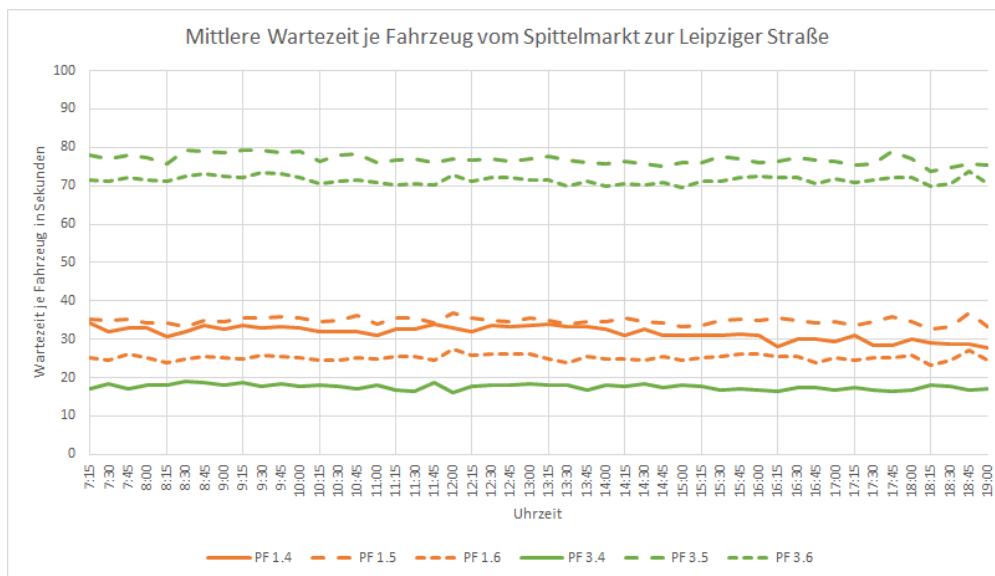


Abbildung 6.32: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁶

¹⁴⁵ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

¹⁴⁶ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

Anhand der richtungsbezogenen Betrachtung der mittleren Wartezeit wird die Koordinierungsrichtung deutlich, eine bestimmte Vorzugsschaltung für den gesamten Tag lässt sich daraus allerdings nicht ableiten. Die stark unterschiedlichen mittleren Wartezeiten je nach Koordinierungsrichtung, erklären aber die starken Veränderungen der mittleren Wartezeiten bei einer zeitabhängigen Steuerung, wie in den Planfällen 1.2 und 3.2.

6.3.3 Feinstaubemissionen

Abschließend wird noch auf die Auswirkungen der einzelnen Signalzeitenpläne auf die Emissionen von Feinstaub und Stickstoffdioxid eingegangen. In Abbildung 6.33 sind die Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 abgetragen. Diese weisen die aus Abschnitt 2.1.2 bekannte Tagesganglinie auf. Deutlich wird hierbei, dass in der Planfallgruppe 3 (grün) mit der geringeren Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h im Tagesverlauf auch geringere Emissionen realisiert werden. Wie auch die Wartezeiten, stehen die Feinstaubemissionen in dieser Planfallgruppe in einer eindeutigen Rangfolge zueinander. Die höchsten Emissionen werden im Planfall 3.6 mit 2,1 g/15 Min. erreicht, bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes um 19:00 Uhr nehmen diese auf 1,4 g/15 Min. ab. Der Planfall liegt im Median 0,22 g niedriger und der Planfall 1.5 ordnet sich dazwischen ein. Diese Rangfolge ist analog zu der der Wartezeit in Abbildung 6.29, wenngleich die relativen Unterschiede zueinander anders gelagert sind.

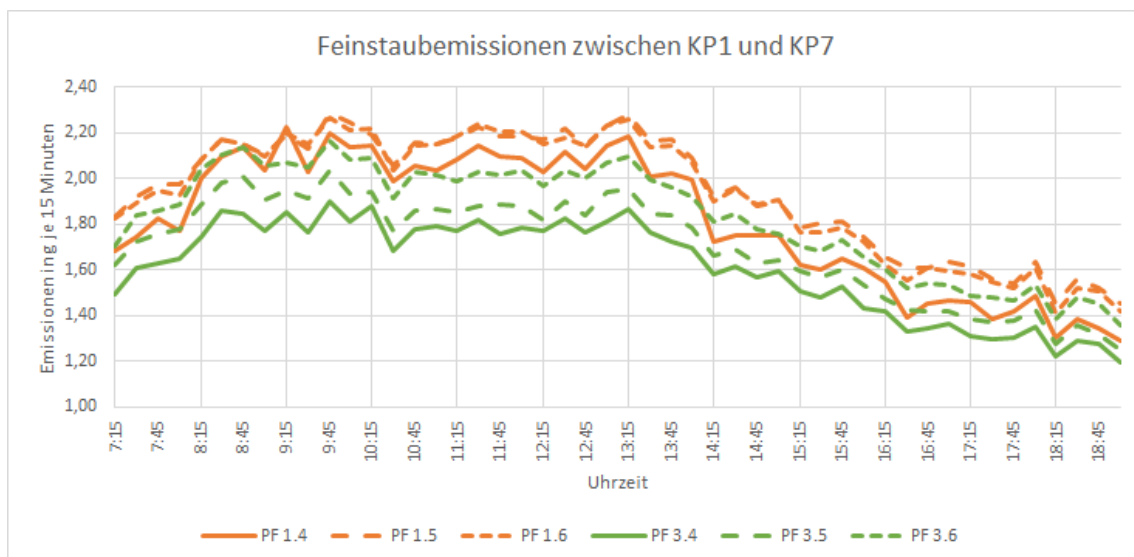


Abbildung 6.33: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁷

¹⁴⁷ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

Die Feinstaubemissionen der Planfallgruppe 1 (orange), verhalten sich dagegen entgegengesetzt zu den Wartezeiten. Die niedrigsten Emissionen werden im Planfall 1.4 erreicht, wobei diese aber dennoch höher sind, als in den Planfällen der Gruppe 3. Die Planfälle dieser Gruppe liegen auch deutlich dichter zusammen, die Planfälle 1.5 und 1.6 weisen nahezu identische Emissionen auf und auch der Median des Abstandes zu Planfall 1.4 ist mit 0,12 g nur halb so groß. Das Maximum in dieser Gruppe liegt bei 2,3 g/15 Min. und das Minimum bei 1,3 g/15 Min..

Die Betrachtung für die Strecke zwischen KP1 und KP5 erfolgt in Abbildung 6.34. Aufgrund der kürzeren Strecke sind die absoluten Feinstaubemissionen geringer. Die Planfälle der Gruppe 3 weisen immer noch geringere Emissionen im Tagesverlauf auf, wobei die Planfälle 3.5 und 3.6 ab 15:00 Uhr höhere Emissionen besitzen als die Planfälle der Gruppe 1. Zwischen den einzelnen Planfällen, und damit den Signalzeitenplänen, dieser Gruppe sind im Tagesverlauf nur geringfügige Unterschiede feststellbar. Einzig der Planfall 3.4 weist deutlich geringere Emissionen auf als die anderen Planfälle.

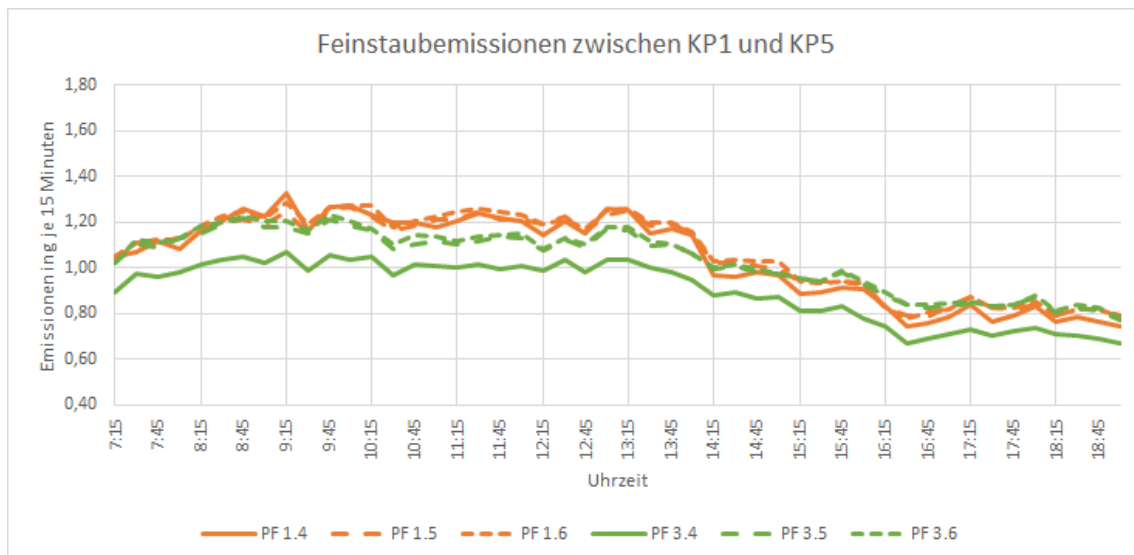


Abbildung 6.34: Feinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁸

Wenn man die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Feinstaubemissionen zusammenfasst wird deutlich, dass in den Planfällen mit einer niedrigeren Höchstgeschwindigkeit weniger Feinstaubemissionen auftreten. Für die Planfallgruppe 3 weist der Planfall 3.4 in beiden Betrachtungen die niedrigsten Emissionen auf und somit wäre der Signalzeitenplan Früh hier für eine ganztägige Schaltung zu bevorzugen. Auch in der Planfallgruppe 1 wäre eine ganztägige Schaltung des Signalzeitenplanes Früh mit den geringsten Emissionen verbunden, siehe dazu auch Tabelle B.1 im Anhang.

¹⁴⁸ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6.3.4 Stickstoffoxidemissionen

In Abbildung 6.35 sind die Stickstoffdioxidemissionen zwischen KP1 und KP7 abgetragen. Auch hierbei ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Planfallgruppen feststellbar, wobei die Planfallgruppe 3 die niedrigeren Emissionen aufweist. Der Verlauf ist aber bei allen Planfällen ähnlich, Zunahme bis etwa 10:00 Uhr, dann bis 14:00 Uhr konstant und anschließend gleichmäßig fallend. Wie auch bei den Feinstaubemissionen weisen die Planfälle 1.4 und 3.4 jeweils die niedrigsten Emissionen auf. Der Planfall 3.4 liegt dabei im Median um 46,8 g niedriger. Die Planfälle 1.5 und 1.6 liegen auf einem ähnlichen Niveau über dem Planfall 1.4. Der Planfall 3.5 weist ein um 3,6 g und der Planfall 3.6 ein um 9,7 g höheres Niveau als der Planfall 3.4 auf.

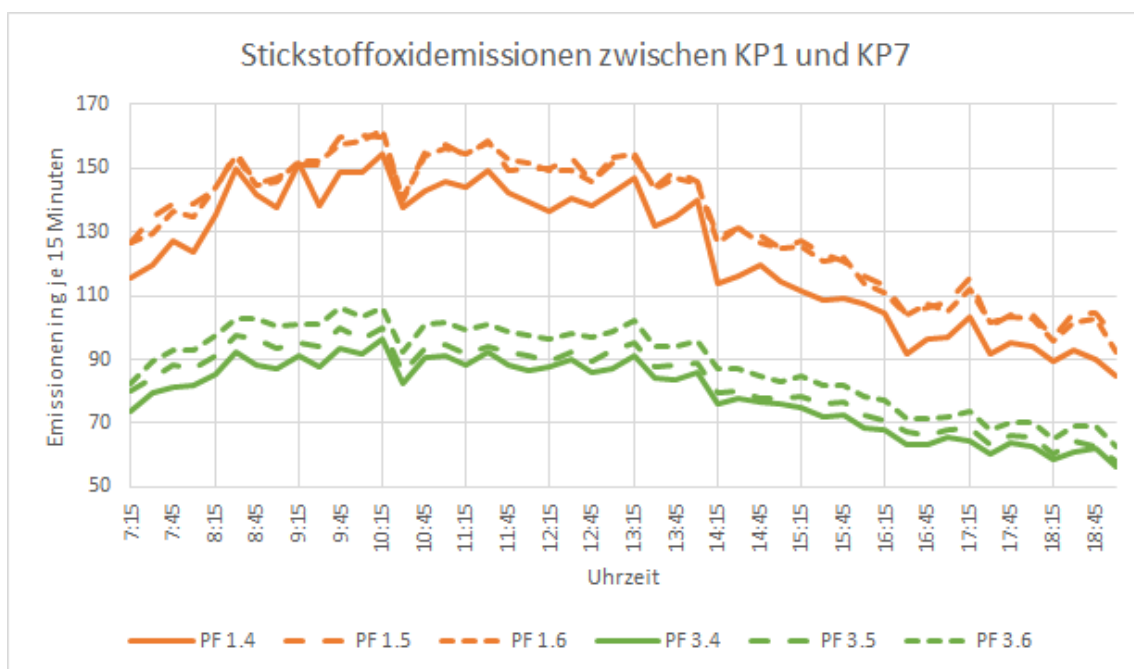


Abbildung 6.35: Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP7 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁴⁹

In Abbildung 6.36 sind die Stickstoffdioxidemissionen zwischen KP1 und KP5 abgetragen. Auch hier verringern sich die Spannweiten deutlich, jedoch ohne eine Veränderung der Rangfolgen. Der Unterschied zwischen den beiden Planfällen jeder Gruppe mit den geringsten Emissionen fällt mit 32,2 g deutlich geringer aus, ab 14:00 Uhr reduziert dieser sich zudem bis auf circa 20 g. Wie bereits bei den Feinstaubemissionen, sind zwischen den einzelnen Planfällen der Gruppe 1 nur geringfügige Unterschiede feststellbar.

¹⁴⁹ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

Im gesamten Untersuchungszeitraum liegen die gesamten Stickstoffdioxidemissionen zwischen KP1 und KP5 bei den Planfällen 1.4 und 1.6 nur um 145,6 g auseinander. In der Planfallgruppe 3 sind es, trotz niedrigerem Niveau, 303,0 g. Allgemein sind auch die tageszeitlichen Schwankungen geringer.

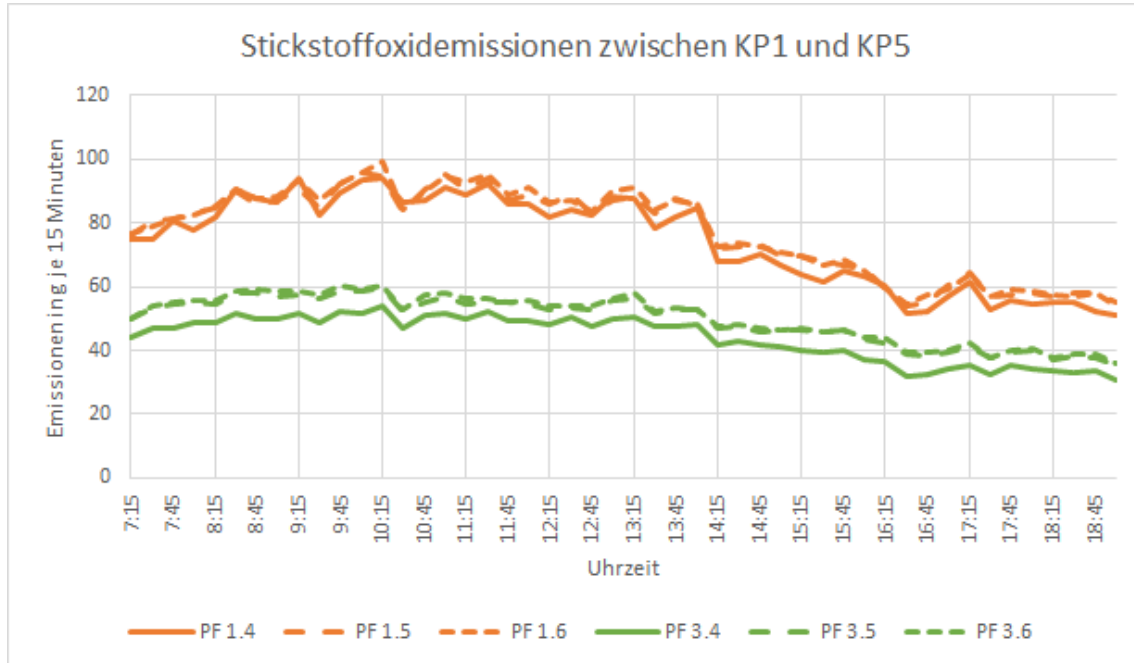


Abbildung 6.36: Stickstoffdioxidemissionen zwischen KP1 und KP5 (Planfälle 1.4, 1.5, 1.6, 3.4, 3.5 und 3.6)¹⁵⁰

Wie auch bei den Feinstaubemissionen wird bei den Stickstoffdioxidemissionen deutlich, dass die Geschwindigkeit einen Einfluss auf die Emissionen hat. Diese sind bei einer geringeren Geschwindigkeit ebenfalls geringer. Auch der aus Emissionsreduktionssicht zu bevorzugende Signalzeitenplan ist identisch. Es ist der Signalzeitenplan Früh, also die Planfälle 1.4 und 3.4. Auch hier ist das Ergebnis beim Planfall 3.4 eindeutiger.

Die Ergebnisse dieser Betrachtung der unterschiedlichen Signalzeitenpläne sind wie folgt zusammenzufassen: In der Planfallgruppe 3 weist der Planfall 3.4 sowohl die geringsten Wartezeiten, als auch die geringsten Emissionen von Schadstoffen auf. Auch eine höhere durchschnittliche Geschwindigkeit wird erreicht. Ein tageszeitabhängiger Wechsel der Signalsteuerung erweist sich mit den derzeitigen Signalzeitenplänen als nachteilhaft und die Steuerung ist demnach optimierungsfähig. In der Planfallgruppe 1 fällt dieses Ergebnis weniger eindeutig aus. Aus der Emissionsperspektive ist der Planfall 1.4 zu bevorzugen. Die Betrachtung der Wartezeiten favorisiert die Planfälle 1.5 und 1.6, je nachdem welche Betrachtungsstrecke gewählt wird. Der große Unterschied im Knotenpunktastand zur restlichen Strecke zwischen KP5 und KP7 führt teilweise zu einer erheblichen Verschiebung der Ergebnisse. Eine eindeutige Entscheidung zur Befürwortung einer zeit-

¹⁵⁰ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

abhängigen Signalsteuerung lässt sich aus diesen Ergebnissen nicht ableiten, stattdessen ist es eher so, dass die Sprünge in den Ergebnissen (Wartezeit und Emissionen) zu den Wechseln der Signalzeitenpläne um 10:00 Uhr und um 14:00 Uhr auch ohne diesen Wechsel auftreten. Dies liegt demnach eher an einer externen Ursache, wie einer veränderten Verkehrsnachfrage. Der bei der Betrachtung der unterschiedlichen speedFactoren nicht eindeutig feststellbare Zusammenhang zwischen zulässiger Geschwindigkeit und Emissionen, ist bei einem speedFactor von 1,3 deutlich gegeben. Bei einer geringeren zulässigen Höchstgeschwindigkeit sind auch die Emissionen geringer und die Wartezeiten höher.

6.4 Koordinierung

Bis auf die Planfälle mit einer verkehrsabhängigen Steuerung, sind alle Planfälle über die gesamte Strecke koordiniert. In den vorhergehenden Betrachtungen wurde nicht darauf eingegangen, dass diese durch die unterschiedlichen Befahrungsgeschwindigkeiten unterschiedlich gut funktionieren. Deshalb folgt eine Betrachtung für die Planfälle 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.2 und 3.3. Für koordinierte Lichtsignalanlagen wird die Verkehrsqualität im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) mit dem Koordinierungsmaß k beschrieben. Dies erfolgt für das Modell allerdings in abgewandelter Form, da eine exakte Berechnung mit den durch das Modell gegebenen Daten für den gesamten Tagesverlauf zu komplex für diese Arbeit wäre. Die Formel zur Berechnung des Koordinierungsmaßes ist (6.1). Da keine Betrachtung der Strecke ohne den ersten Knotenpunkt möglich ist, wird die gesamte Strecke betrachtet. Dadurch kommt es wahrscheinlich zu einer Verschlechterung des Koordinierungsmaßes, da die Fahrzeuge am jeweils ersten Knotenpunkt, KP1 bzw. KP7, nicht koordiniert eintreffen.

$$k_i = \frac{\sum_{m=1}^{M_F} n_{D,n_{LSA},i,m}}{n_{LSA} \cdot M_F} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Demnach wird n_{LSA} , welches die Anzahl Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen wiedergibt, mit sechs verwendet. M_F beschreibt die Messfahrten, welche die gesamte Strecke passiert haben. Mit $n_{D,n_{LSA},i,m}$ ist die Anzahl der Durchfahrten ohne Halt an den signalisierten Knotenpunkten eines Fahrzeuges gemeint. Auch dieser Wert lässt sich mit dem verwendeten Modell nicht bestimmen, da es nur die Gesamtzahl an Halten gibt. Hilfsweise wird deshalb angenommen, dass jedes Fahrzeug an jedem Knotenpunkt maximal einmal hält. Mit dieser Annahme ergibt sich die Anzahl an Durchfahrten ohne Halt für ein Fahrzeug aus der Differenz von n_{LSA} und den Halten. Dieses so bestimmte Ergebnis nähert sich dem Berechnungsverfahren nach dem HBS an. Es ist allerdings von einer tendenziellen Verschlechterung auszugehen, da die meisten Anpassungen der Berechnung zu

Lasten einer optimalen Koordinierung gehen.¹⁵¹ In Tabelle 6.2 ist die Überführung des Koordinierungsmaßes in Güteaussagen zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Verkehrsqualität bei koordinierten Lichtsignalanlagen¹⁵²

Koordinierungsmaß	Koordinierungsqualität
$\geq 95 \%$	sehr gute Qualität
$\geq 85 \%$	gute Qualität
$\geq 75 \%$	mittlere Qualität
$\geq 65 \%$	mäßige Qualität
$< 65 \%$	unwirksame Koordinierung

In Abbildung 6.37 ist der zeitliche Verlauf des Koordinierungsmaßes in Fahrtrichtung Osten angegeben. Betrachtet werden hierbei nur die verkehrsabhängige Steuerung sowie jeweils die beiden Planfälle mit einem unterschiedlichen speedFactor. Damit von einer Koordinierung gesprochen werden kann, ist laut HBS ein Maß von mindestens 65 % notwendig, dieses wird in den meisten Fällen jedoch unterschritten. Vor allem bis 10:00 Uhr ist das Koordinierungsmaß mit unter 50 % besonders niedrig. Im Planfall 1.1 steigt dieses dann bis auf 69 % an, dies spricht für eine mäßige Qualität der Koordinierung. Ab 14:00 Uhr ist auch in den Planfällen 3.1 und 3.2 ein Anstieg auf über 60 % zu verzeichnen. Im Planfall 3.2 wird teilweise ein Koordinierungsmaß von 60 % erreicht. Der Planfall 1.2 liegt mit 55 % bis 60 % etwas niedriger. Mit einer verkehrsabhängigen Steuerung wird das niedrigste Koordinierungsmaß erreicht, dies liegt in beiden Fällen bei unter 30 %. Aufgrund der verlustzeitenbasierten Steuerung, wird hier kaum ein durchgehender Verkehrsfluss ermöglicht.

In die entgegengesetzte Richtung, welche in Abbildung 6.38 dargestellt wird, ist die Qualität der Koordinierung deutlich höher. Dies zeigte sich auch schon bei der Betrachtung der mittleren Wartezeiten, welche in der westlichen Fahrtrichtung deutlich geringer sind. Auch in diese Fahrtrichtung weist die verkehrsabhängige Steuerung das geringste Koordinierungsmaß auf. Dies liegt bei um die 40 % und zeigt also auch hier eindeutig den nicht-koordinierten Zustand. In den Planfällen 1.1 und 1.2 wird fast im gesamten Tagesverlauf ein konstantes Koordinierungsmaß von fast 75 % erreicht. Im Planfall 1.2 wird diese Schwelle bis 10:00 Uhr sogar überschritten, sodass hier von einer mittleren Qualität der Koordinierung gesprochen werden kann. Bis 10:00 Uhr weisen die Planfälle 3.1 und 3.2 eine dazu ähnliche Qualität auf, welche dann allerdings deutlich auf unter 60 % abfällt, sodass hier nicht mehr von einer wirksamen Koordinierung ausgegangen werden kann. Abschließend ist festzustellen, dass maximal eine mittlere Qualität der Koordinierung erreicht wird. Über beide Fahrtrichtungen betrachtet, kann auch nicht eindeutig festgestellt werden, mit welchem speedFactor ein größeres Koordinierungsmaß erzielt wird. Die

¹⁵¹ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015a, S. S4-53.

¹⁵² vgl. ebd., S. S4-53f

6 Auswertung

Koordinierung ist aber in der Planfallgruppe 1 besser als in der Planfall 3 und bei einer verkehrsabhängigen Steuerung ist keinerlei Koordinierung festzustellen, dies war allerdings auch nicht zu erwarten. Die Ergebnisse sprechen also nicht für eine besonders gute Koordinierung, allerdings ist auch festzuhalten, dass es durch die angepassten Berechnungsmethoden zu einer Verschlechterung des Koordinierungsmaßes kommt.

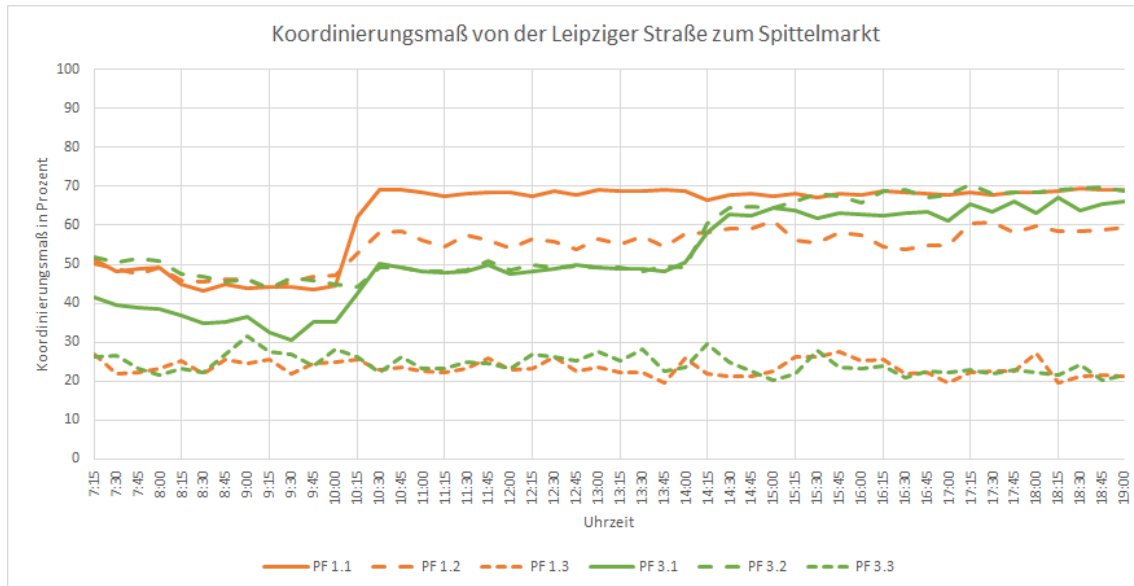


Abbildung 6.37: Koordinierungsmaß, Fahrtrichtung Ost (Planfälle 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.2 und 3.3)¹⁵³

¹⁵³ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

6 Auswertung

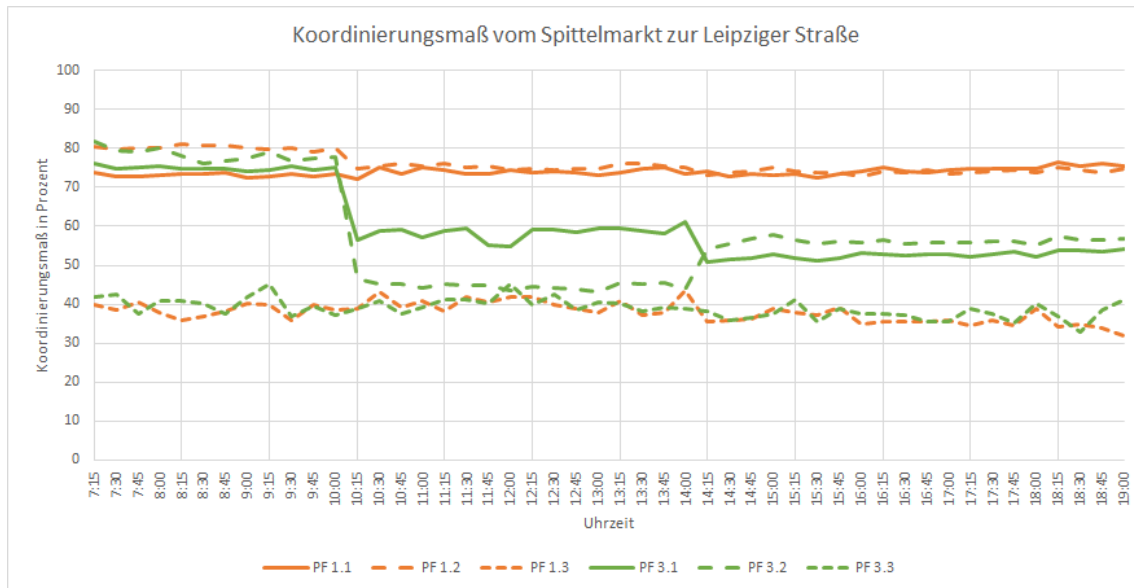


Abbildung 6.38: Koordinierungsmaß, Fahrtrichtung West (Planfälle 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.2 und 3.3)¹⁵⁴

¹⁵⁴ eigene Darstellung (Die Kurven dienen nur der Visualisierung.)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Betrachtung der verschiedenen Planfallkombinationen haben sich diverse Ergebnisse herauskristallisiert. Wenn maximal mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gefahren wird, treten bei einem speedFactor von 1,0 bei 50 km/h die geringsten Emissionen auf. Da dies aber nicht dem realen Verhalten entspricht, wurde in den anderen Planfällen ein speedFactor von 1,3 verwendet. Bei diesem speedFactor wurde dann deutlich, dass die Emissionen bei 30 km/h geringer sind, also eine niedrigere Geschwindigkeit auch zu einer Emissionsminderung führt. In Abbildung 7.1 sind die gesamten Stickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5 dargestellt, für die gesamte Strecke siehe Tabelle B.1. Der Effekt der Emissionsminderung bei niedrigerer Geschwindigkeit ist hier über alle Planfälle festzustellen. Bei den in Abbildung 7.2 dargestellten Feinstaubemissionen tritt dieser Effekt deutlich schwächer auf und der Effekt ist nur im direkten Vergleich der jeweils zusammengehörigen Planfälle sichtbar.

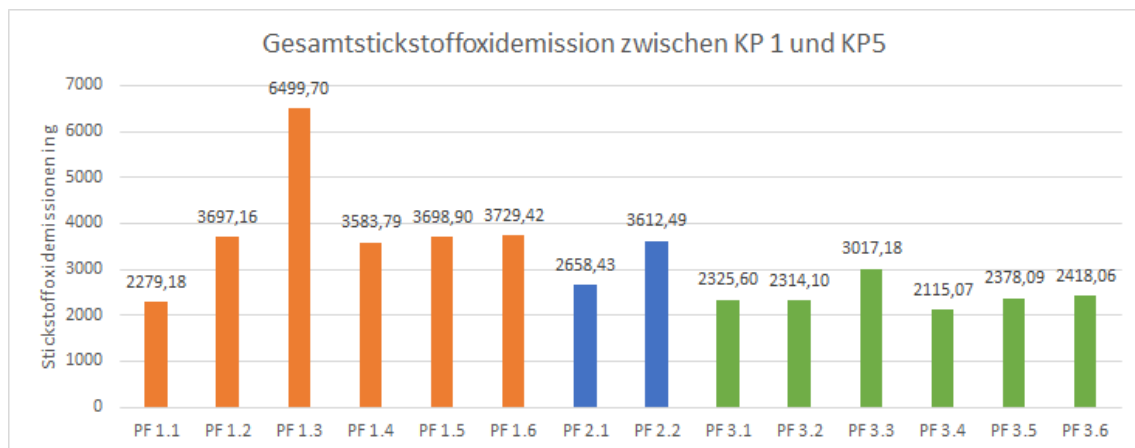


Abbildung 7.1: Gesamtstickstoffoxidemissionen zwischen KP1 und KP5¹⁵⁵

Analog zu den sinkenden Emissionen erhöht sich die Wartezeit, der Vergleich der Gesamtwarezeiten ist in Abbildung 7.3 zwischen KP1 und KP5 dargestellt. Die Wartezeiten über die gesamte Strecke sind in Tabelle B.2 aufgeführt. Aufgrund dessen, dass aber geringfügig höhere relative Geschwindigkeiten realisiert werden, ist von keinem spürbar schlechteren Verkehrsfluss auszugehen. In den Planfällen 2.1 und 2.2 treten durch Schwächen in der Koordinierung durchweg höhere Emissionen auf.

¹⁵⁵ eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

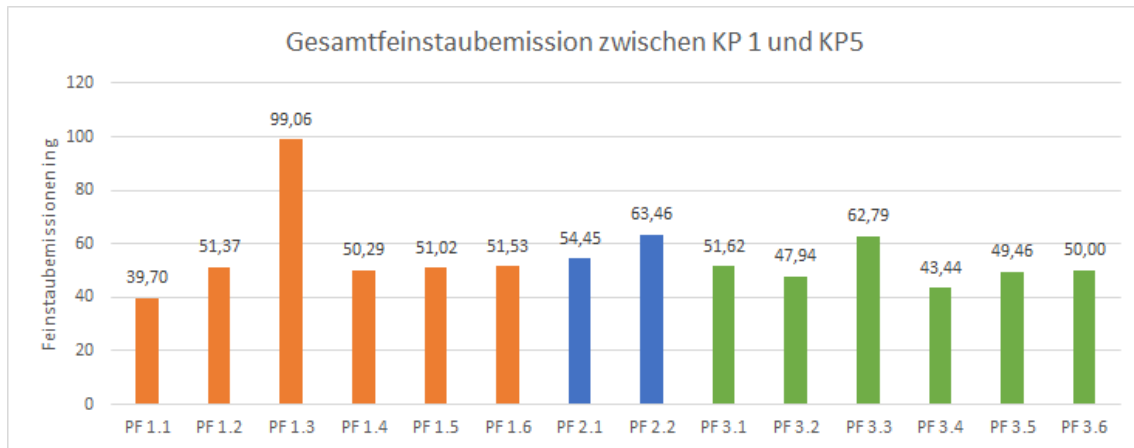


Abbildung 7.2: Gesamtfeinstaubemissionen zwischen KP1 und KP5¹⁵⁶

Durch eine verkehrsabhängige Steuerung konnten keine Verbesserungen des Verkehrsflusses oder der Schadstoffemissionen realisiert werden. Vor allem in der Planfallgruppe 1 verschlechterten sich die Ergebnisse deutlich. Durch eine Anpassung der Signalzeitenpläne könnten sowohl in der Planfallgruppe 1 als auch 3 die Schadstoffemissionen und die Wartezeiten gesenkt werden. In beiden Fällen wäre die kontinuierliche Verwendung eines Signalzeitenplanes sinnvoll, obwohl dies zur Benachteiligung einer Lastrichtung führen würde. Einen direkten Zusammenhang zwischen der Güte der Koordinierung und den anderen Parametern ist über alle Planfälle hinweg nicht eindeutig festzustellen. Der größte Zusammenhang besteht dabei zu den Wartezeiten.

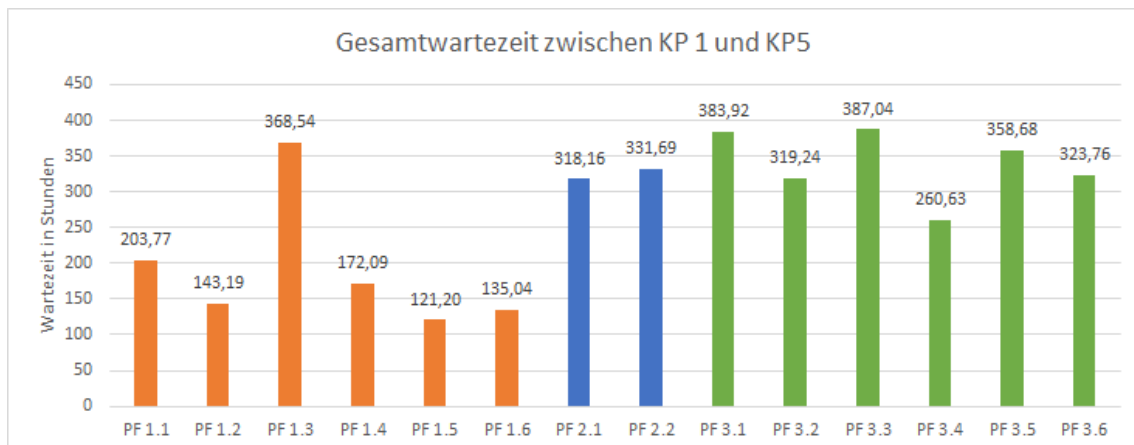


Abbildung 7.3: Gesamtwartezeit zwischen KP1 und KP5¹⁵⁷

Zwischen den beiden Planfällen 1.2 und 3.2 tritt auf der Strecke zwischen KP1 und KP5 eine Reduktion der Feinstaubemissionen von 3,43 g im Untersuchungszeitraum auf das ist eine Reduktion um etwa 6,7 %. Bei den Stickstoffoxidemissionen ist eine Minderung

¹⁵⁶ eigene Darstellung.

¹⁵⁷ eigene Darstellung.

um 1.383,06 g zu verzeichnen, was einer Änderung von 37,4 % entspricht. Damit ist die Reduktion der Stickstoffoxidemissionen wesentlich stärker als die der Feinstaubemissionen. Es wurden diese beiden Planfälle gewählt, da diese den Zuständen im Pilotvorhaben in der Leipziger Straße am nächsten kommen. In dem Pilotprojekt wurde eine Reduzierung der Immissionsbelastung mit Stickstoffdioxid um 4 % im Jahresmittel festgestellt.¹⁵⁸ Diese Änderung ist wesentlich geringer als die mit dem vorgestellten Modell festgestellten Reduktionen der Emissionen. Dies könnte unter anderem daran liegen, dass im Modell nur die Emissionen gemessen wurden, während in dem Pilotprojekt die tatsächlichen Immissionen betrachtet werden. Da diese nur zu einem Teil aus den Emissionen des Straßenverkehrs bestehen, wirken sich die dortigen Änderung wesentlich schwächer aus. Für die Belastung mit Feinstaub wurde in anderen Untersuchungen bereits festgestellt, dass bei einer Reduzierung des Verkehrsaufkommens um bis zu 30 % die Immissionen nur um 4 % reduziert werden.¹⁵⁹ Dies entspricht auch dem hier festgestellten Verhältnis für Stickstoffdioxid. Außerdem wurde bei dem Berliner Pilotprojekt der Stickstoffdioxidwert betrachtet, im Modell wurden alle Stickstoffoxide kumuliert. Auch die Abnahme der Feinstaubemissionen konnte im Modell nachempfunden werden und liegt in einer Größenordnung, welche bei anderen Modellversuchen festgestellt wurde. Der dort festgestellte Schluss, dass bei einer Geschwindigkeitsüberwachung höhere Reduktionen möglich sein würden, konnte nicht für alle Geschwindigkeiten reproduziert werden. In den Planfallgruppen 1 und 2 ist dieser Effekt feststellbar, für die Planfallgruppe 3 werden bei höheren Geschwindigkeiten niedrigere Emissionen verzeichnet.¹⁶⁰ Die Einflüsse der Verkehrsverstetigung werden nur indirekt bei der Betrachtung der verkehrsabhängigen Steuerung sichtbar, da alle anderen Planfälle über eine Koordinierung verfügen. Im Vergleich zur verkehrsabhängigen Steuerung sind allerdings erhebliche Reduktionen in den koordinierten Planfällen sichtbar.

Im Zuge der COVID-19-Pandemie kam es zu erheblichen Verkehrsnachfrageeinbrüchen, sodass durch die stark verringerte Verkehrsnachfrage die Auswirkungen auf die Luftqualität deutlich wurden. Der Erkenntnisstand von Anfang Mai 2020 wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

In Berlin lag die Verkehrsbelastung am Nachmittag Mitte März 30 % unter der Vorjahresbelastung. Auch in anderen deutschen Städten wurden deutliche Nachfrageeinbrüche verzeichnet.¹⁶¹ Bei dem Vergleich der Belastung von Anfang März, also vor der Ausweisung von Kontaktbeschränkungen, mit der von Ende März ist für den Tempelhofer Damm ein Rückgang des Verkehrs von 25 % festzuhalten. In der Leipziger Straße lag der Rückgang sogar bei einem Drittel, gleichzeitig hat sich das Lkw-Aufkommen deutlich

¹⁵⁸ vgl. DPA 2020, o. S.

¹⁵⁹ vgl. Diegmann et al. 2006, S. 12.

¹⁶⁰ vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2015c, S. 7.

¹⁶¹ vgl. Lehmann et al. 2020, o. S.

erhöht.¹⁶² Eine direkte Feststellung, ob es dadurch zu einer Veränderung der Luftqualität kommt, ist nur schwer möglich, da die lokale Belastung auch durch viele andere Faktoren, wie Landwirtschaft und Wetter, beeinflusst wird. In Hessen wurden an den Messstationen eine um 40 % reduzierte Stickstoffdioxidbelastung festgestellt. Dies wird auf die verringerte Verkehrsnachfrage zurückgeführt.¹⁶³ In Berlin konnte zeitweise eine Reduktion der Luftbelastung und eine damit verbundene verbesserte Luftqualität festgestellt werden, allerdings ist diese anschließend auch wieder angestiegen und liegt nur leicht unter dem normalen Niveau. Auch hierbei sind die verzerrenden Effekte durch das Wetter zu beobachten.¹⁶⁴ Auch in dieser besonderen Situation zeigt sich, dass eine reduzierte Verkehrsnachfrage die Luftqualität verbessern kann. Die Qualität lässt sich aufgrund des kurzen Effektes allerdings nicht eindeutig bestimmen.

¹⁶² vgl. Neumann 2020, o. S.

¹⁶³ vgl. Umweltbundesamt 2020a, o. S.

¹⁶⁴ vgl. Achternbosch 2020, o. S.

Literatur

- © OpenStreetMap-Mitwirkende, Hrsg. (2020): *OpenStreetMap*. URL:
<https://www.openstreetmap.org/copyright>.
- Achternbosch, Yannik (3. Apr. 2020): *Sorgt das Coronavirus wirklich für weniger Luftverschmutzung?* In: *Tagesspiegel*. URL:
<https://www.tagesspiegel.de/berlin/berliner-luft-sorgt-das-coronavirus-wirklich-fuer-weniger-luftverschmutzung/25699472.html>
(besucht am 07.05.2020).
- Behörde für Umwelt und Energie Hamburg, Hrsg. (2020): *FAQ Dieseldurchfahrtsbeschränkungen*. URL:
<https://www.hamburg.de/durchfahrtsbeschraenkungen/11067546/dieseldurchfahrtsbeschraenkungen-faq/> (besucht am 20.01.2020).
- Butler, Tim M.; Von Schneidemesser, Erika; Becker, Sophia (2018): *Bekämpfung der städtischen Luftverschmutzung: Stickoxide und Dieselemissionen*. deu. In: *IASS Policy Brief*. DOI: 10.2312/IASS.2018.023.
- BVG Bereich Angebot, Hrsg. (2019): *Bus 200 S+U Zoologischer Garten <> Prenzlauer Berg, Michelangelostr*. URL: <https://www.bvg.de/images/content/linienverlaeufe/LinienverlaufBus200.pdf>
(besucht am 25.03.2020).
- Degraeuwe, Bart; Thunis, Philippe; Clappier, Alain; Weiss, Martin; Lefebvre, Wouter; Janssen, Stijn; Vranckx, Stijn (Dez. 2017): *Impact of passenger car NOX emissions on urban NO2 pollution – Scenario analysis for 8 European cities*. In: *Atmospheric Environment* 171, S. 330–337. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.040.
- Deutscher Wetterdienst, Hrsg. (2020): *Stickoxide (NO, NO2, NOx, NOy)*. URL:
https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/nox_node.html (besucht am 21.01.2020).
- Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH, Hrsg. (2019): *Difu-Berichte 3/2019 – Was ist eigentlich ein Luftreinhalteplan?* URL: <https://difu.de/publikationen/difu-berichte-32019/was-ist-eigentlich-ein-luftreinhalteplan.html>
(besucht am 19.01.2020).
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Hrsg. (2020): *Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes*. URL: https://sumo.dlr.de/docs/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes.html (besucht am 28.02.2020).

- Diegmann, V.; Dünnebeil, F.; Helms, H.; Lambrecht, U.; Pfäfflin, F.; Wiegand, Dr. G.; Wursthorn, H. (2006): *Verkehrliche Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub – Möglichkeiten und Minderungspotenziale*. Hrsg. von Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3259.pdf> (besucht am 24.02.2020).
- Dietz, Volker; Hausmann, Andrea; Mutke, Gerrit; Pausch, Annette; Roß, Tilo; Wolf, Uwe; Zellbeck, Hans (2017): *Stickoxidemissionen von Kfz an Steigungsstrecken*. In: *Schriftenreihe* (Heft 14/2017). Hrsg. von Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. URL: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29877> (besucht am 02.03.2020).
- DPA (6. Jan. 2020): *Senat: Tempo 30 wirkt kaum*. In: *Märkische Oderzeitung*.
- Düring, Ingo; Lohmeyer, Achim; Moldenhauer, Antje (2008): *Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen*. ger. Hrsg. von Bundesanstalt für Straßenwesen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen : Verkehrstechnik BV008170906 174. Karlsruhe und Dresden. Kap. Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen.
- Erdmann, Jakob (2014): *Lane-Changing Model in SUMO*. In: URL: https://elib.dlr.de/89233/1/SUMO_Lane_change_model_Template_SUMO2014.pdf (besucht am 15.01.2020).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2002): *Verkehrsmanagement – Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen [FGSV-Arbeitspapier Nr. 56]*. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2006): *Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06)*. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2010): *Empfehlung für Radverkehrsanlagen (ERA)*. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2014): *Wirkung von Maßnahmen zur Umweltentlastung. Teil 3 Umweltsensitives Verkehrsmanagement (UVM)*. Radebeul, Aachen und Essen.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2015a): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Teil 5 Stadtstraßen*. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2015b): *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. (2015c): *Wirkung von Maßnahmen zur Umweltentlastung. Teil 1 Stadtgeschwindigkeitskonzepte und Tempo 30*. Recklinghausen u. a.

- Fröhlich, Alexander; Hasselmann, Jörn; Polonyi, Max; Törne, Lars von (9. Apr. 2018): *Leipziger Straße: Umweltsenatorin Günther prüft sogar Fahrverbot*. In: *Der Tagesspiegel*. URL: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/berlin-mitte-leipziger-strasse-umweltsenatorin-guenther-prueft-sogar-fahrverbot/21151456.html> (besucht am 30. 12. 2019).
- Gerlofs-Nijl, Miriam E; Cassee, Flemming R; Salonen, Raimo O (2012): *Evidence from toxicology, including human clinical studies*. In: *Health effects of black carbon*. Hrsg. von WHO. Kopenhagen. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/162535/e96541.pdf?ua=1 (besucht am 28. 02. 2020).
- Hausberger, S.; Matzer, C.; Keller, M.; Wüthrich, P.; Notter, B. (2017): *Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)*.
- Kraetzer, Ulrich (11. Juli 2018): *Bessere Luft an der Leipziger Straße dank Tempo 30*. In: *Berliner Morgenpost*. URL: <https://www.morgenpost.de/bezirke/mitte/article214815071/Bessere-Luft-an-der-Leipziger-Strasse-dank-Tempo-30.html> (besucht am 30. 12. 2019).
- Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg. (2019): *Bestand an Pkw am 1. Januar 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten*. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_dusl.html?nn=663524 (besucht am 27. 03. 2020).
- Landeshauptstadt Stuttgart, Hrsg. (2020): *Was steckt hinter den Diesel-Verkehrsverboten?* URL: <https://www.stuttgart.de/diesel-verkehrsverbot> (besucht am 20. 01. 2020).
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Hrsg. (2005): *Fachberichte LUA NRW 7/2005 Feinstaubkohortenstudie Frauen in NRW*. Essen. URL: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/gesundheit/pdf/fachbericht7_luanrw.pdf (besucht am 10. 02. 2020).
- Landrigan, Philip J et al. (Feb. 2018): *The Lancet Commission on pollution and health*. In: *The Lancet* 391(10119), S. 462–512. DOI: 10.1016/s0140-6736(17)32345-0.
- Lehmann, Hendrik; Gegg, Michael; Kostrzynski, Manuel; Meidinger, David; Wittlich, Helena (24. März 2020): *Der Verkehr in den Großstädten nimmt drastisch ab*. In: *Tagesspiegel*. URL: <https://interaktiv.tagesspiegel.de/lab/sars-cov-2-der-verkehr-in-den-grossstaedten-nimmt-drastisch-ab/> (besucht am 07. 05. 2020).
- LK Argus GmbH, Hrsg. (2013): *Evaluierung von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen in Berlin*. Berlin. URL: http://www.cerclebruit.ch/studies/vreduktion/0715_6_5_1_Berlin_Ergebnisse_Evaluierung_T30.pdf (besucht am 26. 02. 2020).

- Lopez, Pablo Alvarez; Behrisch, Michael; Bieker-Walz, Laura; Erdmann, Jakob; Flötteröd, Yun-Pang; Hilbrich, Robert; Lücken, Leonhard; Rummel, Johannes; Wagner, Peter; Wießner, Evamarie (2018): „Microscopic Traffic Simulation using SUMO“. In: *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE. URL: <https://elib.dlr.de/127994/1/08569938.pdf> (besucht am 15.01.2020).
- Neumann, Peter (8. Feb. 2019): *Leipziger Straße Was die Tempo-30 – Zonen tatsächlich bringen*. In: *Berliner Zeitung*. URL: <https://archiv.berliner-zeitung.de/berlin/verkehr/leipziger-strasse-was-die-tempo-30-zonen-tatsaechlich-bringen-32011000> (besucht am 30.12.2019).
- Neumann, Peter (31. März 2020): *Weniger Individualverkehr, dafür mehr Brummis*. In: *Berliner Zeitung*. URL: <https://www.berliner-zeitung.de/mensch-metropole/staus-sind-in-berlin-waehrend-der-corona-krise-eine-seltenheit-geworden-li.80005> (besucht am 07.05.2020).
- Schulz, Bert (5. Jan. 2020): *Tempo 30 hilft – ein bisschen*. In: *Die Tageszeitung (taz)*. URL: <https://taz.de/Kampf-gegen-Verkehrsdreck-in-Berlin/!5650172/> (besucht am 10.01.2020).
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Hrsg. (2019): *Übergeordnetes Straßennetz Bestand*. URL: https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp?loginkey=showMap&mapId=verkehr_strnetz@senstadt (besucht am 20.04.2020).
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Hrsg. (2019): *Luftreinhalteplan für Berlin 2. Fortschreibung*. URL: https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/luftreinhalteplan_2025/download/Luftreinhalteplan.pdf (besucht am 07.01.2020).
- Topp, Harmut (2014): *Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen mit Wohnnutzung*. In: *Straßenverkehrstechnik* (1.2014), S. 23–30.
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2009): *Feinstaubbelastung in Deutschland*. Dessau. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3565.pdf> (besucht am 20.01.2020).
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2019): *Häufig gestellte Fragen (FAQ) zum Thema Stickstoffdioxid – gesundheitliche Bedeutung und die Rolle von Grenzwerten*. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/faq_stickstoffdioxid-grenzwerte.pdf (besucht am 15.01.2020).

Literatur

- Umweltbundesamt, Hrsg. (2020a): *FAQ: Auswirkungen der Corona-Krise auf die Luftqualität*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/faq-auswirkungen-der-corona-krise-auf-die#welche-auswirkungen-hat-die-corona-krise-auf-die-stickstoffdioxid-belastung> (besucht am 07.05.2020).
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2020b): *Luftreinhalte- und Aktionspläne in Deutschland*. URL: <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/lrp.php> (besucht am 20.01.2020).
- VMZ Berlin c/o Rumen Genow, Hrsg. (2018): *Ergebnisfolie aus Besprechungsunterlage vom 14.06.2018 zum Thema "Verkehrliche Wirkung von Tempo 30 und Tempo 50 mit Verkehrsverstetigung als Maßnahmen des Luftreinhalteplans zur Reduzierung von NO₂"*.

Anhang

A Kalibrierung

Tabelle A.1: gemittelte Korrekturfaktoren

Uhrzeit	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7
07:00 Uhr bis 08:00 Uhr	1,04	1,16	1,07	0,97	0,97	1,00	1,00
08:00 Uhr bis 09:00 Uhr	1,08	1,18	1,05	0,96	0,96	0,98	1,00
09:00 Uhr bis 10:00 Uhr	1,06	1,13	1,02	0,95	0,95	0,95	1,00
10:00 Uhr bis 11:00 Uhr	1,02	1,18	0,96	0,95	0,95	0,96	1,00
11:00 Uhr bis 12:00 Uhr	1,10	1,12	1,03	0,98	0,99	1,03	1,00
12:00 Uhr bis 13:00 Uhr	1,16	1,02	0,98	0,95	0,94	1,05	1,00
13:00 Uhr bis 14:00 Uhr	1,13	1,10	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
14:00 Uhr bis 15:00 Uhr	0,92	0,96	0,85	0,85	0,85	0,91	1,00
15:00 Uhr bis 16:00 Uhr	0,84	0,89	0,75	0,81	0,79	0,83	1,00
16:00 Uhr bis 17:00 Uhr	0,79	0,82	0,67	0,76	0,74	0,83	1,00
17:00 Uhr bis 18:00 Uhr	0,76	0,80	0,67	0,75	0,71	0,81	1,00
18:00 Uhr bis 19:00 Uhr	0,73	0,81	0,72	0,71	0,73	0,77	1,00

B Gesamtübersicht

Tabelle B.1: Übersicht Emissionen

Planfall	Feinstaubemissionen in g		Stickstoffoxidemissionen in g	
	KP1 – KP5	KP1 – KP7	KP1 – KP5	KP1 – KP7
1.1	39,70	73,81	2279,18	4176,23
1.2	51,37	92,29	3697,16	6315,29
1.3	99,06	144,86	6499,70	9389,23
1.4	50,29	87,51	3583,79	5938,90
1.5	51,02	93,56	3698,90	6428,23
1.6	51,53	92,87	3729,42	6386,82
2.1	54,45	90,74	2658,43	4463,59
2.2	63,46	101,25	3612,49	5736,26
3.1	51,62	89,81	2325,60	4064,27
3.2	47,94	82,60	2314,10	4012,96
3.3	62,79	101,85	3017,18	4904,38
3.4	43,44	77,48	2115,07	3792,03
3.5	49,46	81,83	2378,09	3973,22
3.6	50,00	88,02	2418,06	4258,08

Tabelle B.2: Übersicht Wartezeiten

Planfall	Wartezeit in Stunden	
	KP1 – KP5	KP1 – KP7
1.1	203,77	329,55
1.2	143,19	277,48
1.3	368,54	548,68
1.4	172,09	315,41
1.5	121,20	272,79
1.6	135,04	243,43
2.1	318,16	432,31
2.2	331,69	447,79
3.1	383,92	523,21
3.2	319,24	448,90
3.3	387,04	567,43
3.4	260,63	355,47
3.5	358,68	475,21
3.6	323,76	501,89

C Verkehrsmodell

Das Verkehrsmodell und die vollständigen Ergebnisse sind unter folgender Adresse zu finden: https://github.com/jorh/Masterarbeit_Jonathan_Rhode