

KURZBERICHTE

Evaluierung der dynamischen Grünen Welle für Radfahrer – Sitraffic SiBike – in Marburg

Sitraffic SiBike ist eine von Siemens entwickelte App, durch die Radfahrer an Knotenpunkten priorisiert werden. Sitraffic SiBike hat das Potential, die Verkehrseffizienz und die Verkehrssicherheit für Radfahrer an lichtsignalisierten Knotenpunkten zu erhöhen. Durch die Priorisierung der ausgerüsteten Radfahrer an lichtsignalisierten Zufahrten wird die Anzahl an Halten reduziert und dadurch ihre Reisegeschwindigkeit innerhalb des koordinierten Streckenzuges erhöht. Gleichzeitig wird aber die Verkehrssituation für den restlichen Verkehr durch die Anpassung der Lichtsignalpläne an die Anforderungen des Radverkehrs geändert. Das Hauptziel dieser Studie ist, die Wirkungen von Sitraffic SiBike auf den Radverkehr sowie auf den motorisierten Verkehr zu untersuchen. Die Ergebnisse der Auswertung basieren auf Verkehrsdaten, die im Rahmen von drei Untersuchungstagen an der Teststrecke in der Stadt Marburg gesammelt wurden. Die Ergebnisse des ersten Pilotversuchs von Sitraffic SiBike in Marburg zeigen, dass Sitraffic SiBike die Anzahl an Halten und die Reisezeiten für den Radverkehr erfolgreich reduziert, ohne gleichzeitig die allgemeine Verkehrssituation für den mV signifikant zu verschlechtern.

Evaluation of the Dynamic “Green Wave” for Bicycle Traffic – Sitraffic SiBike – in Marburg

Sitraffic SiBike is a mobile phone application developed by Siemens that prioritizes bicyclists at signalised intersections. Sitraffic SiBike has the potential to increase traffic efficiency and traffic safety for bicyclists. The prioritization reduces the number of stops of equipped bicyclists at signalised intersections. Additionally, travel speed is increased along the route. At the same time, the traffic situation for other road users is altered due to the adjustment of the traffic control plan to cater to the requirements of bicycle traffic. The main objective of this study is to examine the effects of Sitraffic SiBike on bicycle traffic as well as on the other road users. The evaluation is based on experimental traffic data collected during three study days at the test site in the city of Marburg. The results of the first experimental trial of Sitraffic SiBike in Marburg suggest that Sitraffic SiBike successfully reduced stops and travel times for bicycle traffic without deteriorating vehicular traffic flow.

1 Einleitung

Derzeit ist die Koordinierung der Lichtsignalsteuerung fast immer nur auf die Bedürfnisse des motorisierten Verkehrs (mV) und des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ausgerichtet und bringt dem langsameren Radverkehr nur wenig Nutzen. Vor allem in Städten, die ein hohes Radverkehrsaufkommen aufweisen, wie Kopenhagen (Hoegh 2007), Amsterdam (Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH 2007), Rotterdam (CROW Fietsberaad 2010), Wien (Mensik, Beyer 2013) und Bern (Baumann 2016), wurde die Koordinierung der Lichtsignalsteuerung an Streckenzügen dem Radverkehr angepasst. Da der Radverkehr starke Schwankungen in den Geschwindigkeitsprofilen aufweist, kommt es bei stati-

schen Grünen Wellen zu Halten, weil nicht jeder Radfahrer die Bemessungsgeschwindigkeit der Grünen Welle einhält. Anhand von Radfahrgeschwindigkeitsdaten, die in 14 Erhebungstrecken in Wien, Linz und Graz erhoben wurden, wurden für unterschiedliche Nutzergruppen und streckenbezogene Merkmale wie Längsneigung und Radverkehrsinfrastruktur unterschiedliche mittlere Wunschgeschwindigkeiten ermittelt, wobei zwischen den mittleren Progressionsgeschwindigkeiten für verschiedene Nutzergruppen Unterschiede von bis zu 10 km/h vorkommen (Mensik, Beyer 2013). An vier Knotenpunkten in München wurden für Radfahrer mittels Videodatenerhebungen Progressionsgeschwindigkeiten zwischen 15 und 22 km/h gemessen (Twaddle, Grigoropoulos 2016).

Eine innovative Technik wird in Rotterdam in den Niederlanden für die Unterstützung einer Koordinierung für Fahrräder durch den Entwurf von baulichen Maßnahmen angewendet. Das System mit dem Namen Evergreen besteht aus LED-Leuchten, beginnend wenige Hundert Meter vor der betrachteten Lichtsignalanlage. Die LEDs zeigen grüne Blöcke und signalisieren Radfahrern so die korrekte Progressionsgeschwindigkeit, um eine haltefreie Durchfahrt zu ermöglichen (CROW Fietsberaad 2010). Ähnlich übermittelt das KoRa-Konzept die Information für die Grüne Welle durch Lauflichter am Fahrbahnrand, wobei auch Radfahrer durch Radarsensoren detektiert werden. Das KoRa-Konzept wurde mittels mikroskopischer Verkehrsflussimulation bewertet. Für den Radverkehr ergibt sich so eine 34%ige Reduktion an Halten sowie Reisezeitgewinne von 7 % im Vergleich zur bestehenden Lichtsignalsteuerung. Aufgrund der hohen Auslastung des motorisierten Verkehrs auf der Untersuchungsstrecke können sich die Rückstauängen an einzelnen lichtsignalisierten Zufahrten nicht rechtzeitig abbauen, bevor der Pulk der vorherigen Zufahrt diesen Knotenpunkt erreicht. Zudem wird die

■ Verfasser

Georgios Grigoropoulos M. Sc.
georgios.grigoropoulos@tum.de

Heather Twaddle M. Sc.
heather.twaddle@tum.de

Dr.-Ing. Matthias Spangler
matthias.spangler@tum.de

Technische Universität München
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Verkehrstechnik
Arcisstraße 21
80333 München

Michael Hagenbring
michael.hagenbring@marburg-stadt.de

Der Oberbürgermeister der Universitätsstadt
Marburg Straßenverkehrsbehörde
Frauenbergstraße 35
35039 Marburg

Michael Düsterwald
michael.duesterwald@siemens.com

Siemens AG
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Reisezeit für alle Fahrzeugklassen reduziert. Die Reduzierung für Personenkraftwagen ist dabei gering (9 Sekunden), größer jedoch für Taxis und Busse (20 bis 25 Sekunden) (Mensik, Beyer 2013).

Sitraffic SiBike (Siemens AG 2017) ist die konsequente Weiterentwicklung von statischen Grünen Wellen zu dynamischen Grünen Wellen für Radfahrer (Bild 1). Mit einer Smartphone-App kann der Radfahrer Freigabezeit anfordern und sich so noch schneller durch die Stadt bewegen. Hierbei kann sowohl nur eine Kreuzung als auch ein gesamter Straßenzug mit mehreren Ampeln auf eine vorher definierte Radfahrgeschwindigkeit ausgelegt werden. Somit kommen Radfahrer in den Genuss einer dynamischen Grünen Welle. Dank der Optimierung der Grünzeit, bei der das grüne Lichtzeichen in der Regel bis sechs Sekunden früher aufleuchtet bzw. bis zu sechs Sekunden verlängert werden kann, wird für den Radfahrer innerhalb eines Streckenzugs die Grüne Welle dynamisiert und die Anzahl der Halte reduziert. Für die Umsetzung der Priorisierung greift Sitraffic SiBike auf die bestehende und bewährte Technik der ÖPNV-Beschleunigung zurück. Durch dieses Verfahren soll für den Radfahrer innerhalb eines Streckenzuges eine „Grüne Welle“ erzeugt werden.

Der Vorteil von Sitraffic SiBike gegenüber einer Koordinierung der Lichtsignalsteuerung für den Radverkehr ist, dass Sitraffic SiBike den Radverkehr unter Berücksichtigung des tatsächlichen Stands der Lichtsignalsteuerung an einer Zufahrt priorisiert, sobald ein Radfahrer durch den Auslösepunkt gefahren ist. So wird die Lichtsignalsteuerung an den Radverkehrsbedarf angepasst. Gleichzeitig sind keinerlei bauliche Eingriffe notwendig – lediglich die Programmierung der Lichtsignalanlagen wird verändert. Dies ist vergleichsweise preiswert und lässt sich ohne größeren Aufwand umsetzen. Auch die Auslösepunkte sind rein softwarebasierte Funktionen und benötigen keine zusätzliche Straßeninfrastruktur. Sitraffic SiBike hat das Potenzial, die Verkehrseffizienz für Radfahrer zu erhöhen. Durch die Priorisierung soll die Anzahl an Halten der ausgerüsteten Radfahrer an Knotenpunktzufahrten reduziert werden, wodurch ihre Reisegeschwindigkeit innerhalb des koordinierten Streckenzuges erhöht wird. Gleichzeitig wird jedoch die Verkehrssituation für den restlichen Verkehr durch die Anpassung der Lichtsignalpläne an die Anforderungen des Radverkehrs geändert.



Bild 1: Sitraffic SiBike – die „Grüne Welle“ für Radfahrer (Siemens AG 2017)



Bild 2: Sitraffic-SiBike-Pilotstrecke in Marburg (Google Earth)

Durch die Fokussierung auf die Priorisierung des Radverkehrs ist zunächst unklar, ob auch der mV innerhalb des koordinierten Streckenzuges wegen der bedingten Verlängerung der Grünzeit profitiert.

Das Hauptziel dieser Studie besteht darin, die Wirkungen von Sitraffic SiBike auf den Radverkehr und den mV zu untersuchen sowie die Unterschiede gegenüber einer Koordinierung für den Radverkehr auszuwerten. Die Untersuchung basiert auf Verkehrsdaten, die im Rahmen von drei Untersuchungstagen an einer Teststrecke in der Stadt Marburg gesammelt wurden.

2 Vorgehensbeschreibung

In diesem Abschnitt wird die Methodik für die Evaluierung von Sitraffic SiBike in der Stadt Marburg beschrieben. Zuerst werden

die entsprechenden Untersuchungsfälle für die Evaluierung von Sitraffic SiBike sowie die entsprechenden Messzeiträume und die maßgebenden Bewertungsindikatoren für die Evaluierung von Sitraffic SiBike definiert. Anschließend werden angemessene Methoden für die Erfassung der ausgewählten Bewertungsindikatoren ausgewählt.

2.1 Die Sitraffic-SiBike-Pilotstrecke in Marburg

Die Sitraffic-SiBike-Pilotstrecke in Marburg besteht aus insgesamt sechs Knotenpunkten der Straßen Erlenring und Alter Kirchhainer Weg und wurde wegen ihrer zunehmenden verkehrlichen Bedeutung für den Radverkehr und vor allem für die verkehrlichen Verbindungen zwischen Universitätsgebäuden der Philipps-Universität Marburg von der Stadt Marburg ausgewählt. Bild 2 stellt die Pilotstrecke sowie die

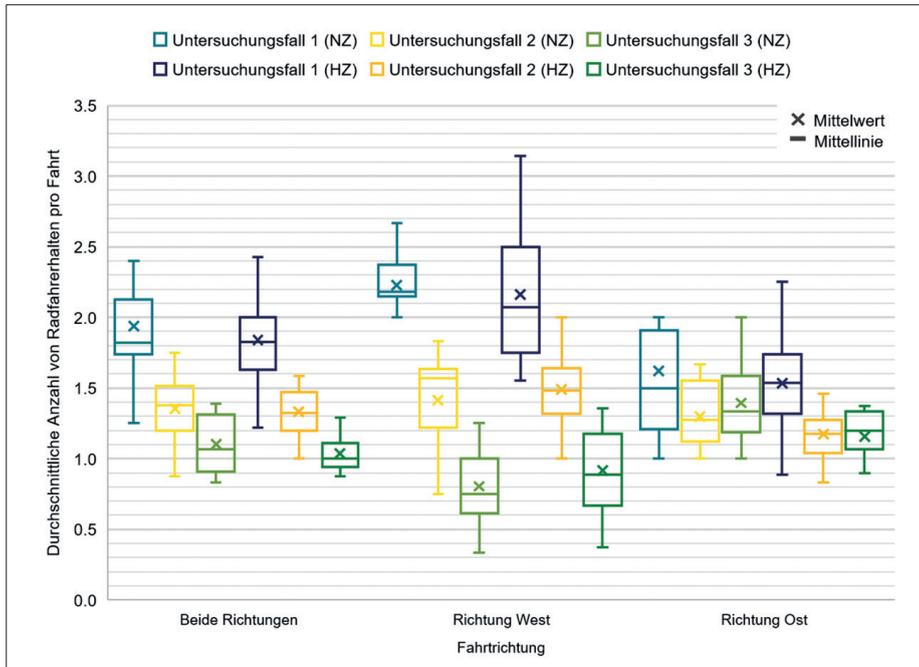


Bild 3: Durchschnittliche Anzahl an Radfahrerhalten pro Fahrt in der Nebenverkehrszeit (NZ) und Hauptverkehrszeit (HZ)

Tabelle 1: Durchschnittliche Anzahl an Radfahrerhalten pro Fahrt Tukey-Kramer-Test

Nebenverkehrszeit Radfahrerhalte Tukey-Kramer-Test			
Fahrtrichtung	Vergleich		Unterschied der Mittelwerte
	Fall A	Fall B	
Ost-West	1	2	-36,5 %*
	1	3	-63,9 %*
	2	3	-43,2 %*
West-Ost	1	2	-19,9 %
	1	3	-14,0 %
	2	3	+7,5 %
Hauptverkehrszeit Radfahrerhalte Tukey-Kramer-Test			
Ost-West	1	2	-32,5 %*
	1	3	-57,7 %*
	2	3	-37,3 %*
West-Ost	1	2	-23,6 %*
	1	3	-24,7 %*
	2	3	-1,3 %

*signifikant unterschiedlich ($\alpha = 0.05$)

Kenntnis der ausgewählten ANPR-Kamera-Standorte dar.

Der Radverkehr wird zwischen Knotenpunkt 1 und 5 auf Radfahrstreifen geführt. Zwischen Knotenpunkt 5 und 6 erfolgt die Führung des Radverkehrs zusammen mit dem mV auf der Straße. Der Pilotstreckenzug überquert die Bundesstraße B 3 und ist für den Radverkehr zwischen dem Studenten-

werk der Universität Marburg und der Universitätsbibliothek besonders wichtig. Die Knotenpunkte 2 und 4 verbinden die Pilotstrecke mit den Ausfahrten der Bundesstraße B 3. Da sowohl die Bundesstraße B 3 als auch der Fluss Lahn die Stadt teilen, fällt dem Erlernen eine wichtige Bedeutung zu, da durch diesen der westliche und östliche Teil verbunden wird. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Gesamtstrecke beträgt

50 km/h. Die Pilotstrecke wird während der Untersuchungsperioden von fünf Stadtbuslinien befahren. Diese befahren die Pilotstrecke entweder mit 30-minütiger oder 60-minütiger Taktzeit. Zusätzlich wird die Buslinie 17 nicht berücksichtigt, da diese die Pilotstrecke an den Versuchstagen nur einmalig pro Tag um 13:00 Uhr durchfährt.

2.2 Untersuchungsfälle

Um eine Evaluierung der Einflüsse von Sitrtraffic SiBike zu ermöglichen, wurde die Verkehrssituation in unterschiedlichen Untersuchungsfällen erfasst und evaluiert.

- Untersuchungsfall 1: Verkehrssituation ohne Sitrtraffic SiBike mit der bestehenden Koordination für den mV
- Untersuchungsfall 2: Verkehrssituation mit einer statischen Koordination für Radfahrer ohne Sitrtraffic SiBike
- Untersuchungsfall 3: Verkehrssituation mit einer statischen Koordination für Radfahrer und zusätzlich der dynamischen Priorisierung durch Sitrtraffic SiBike.

Der Vergleich von Untersuchungsfall 3 mit Untersuchungsfall 2 soll zeigen, inwiefern Sitrtraffic SiBike eine zusätzliche signifikante Verbesserung für die Radverkehrseffizienz im Gegensatz zu einer statischen Koordination für Radfahrer zur Folge hat und ob sich Sitrtraffic SiBike als eine vorteilhafte Lösung gegenüber einer reinen Radfahrerkoordination festigt. Zusätzlich wird der Vergleich zwischen Untersuchungsfall 2 und 3 zeigen, ob die Koordination für den Radverkehr oder Sitrtraffic SiBike vorteilhafter für die Verkehrseffizienz des mV ist. Mit Untersuchungsfall 1 wurden im September 2016 zusätzlich Radverkehrsdaten erhoben, die auch für den Entwurf der Radfahrerkoordination und die Umsetzung von Sitrtraffic SiBike notwendig waren. Die Untersuchungsfälle 2 und 3 wurden jeweils im Oktober 2016 durchgeführt. Des Weiteren wurden Verkehrsdaten für die drei Untersuchungsfälle während der Hauptverkehrszeit sowie während der Nebenverkehrszeit erhoben. Der Vergleich dieser zwei Messzeiträume soll zeigen, ob Sitrtraffic SiBike in beiden Verkehrssituationen auf dem Streckenzug eingesetzt werden kann. Die Messzeiträume wurden in Kooperation mit der Stadt Marburg definiert und waren für alle Untersuchungsfälle gleich. Für die Nebenverkehrsuntersuchung wurde der Messzeitraum 14:00 bis 15:00 Uhr ausgewählt. Die

Hauptverkehrsuntersuchung fand zwischen 15:30 und 17:30 Uhr statt.

2.3 Bewertungsindikatoren

Die Evaluierung stützt sich auf bestimmte verkehrliche Indikatoren. Gemäß den RiLSA (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010) ist die Anzahl an Halten in koordinierten Streckenzügen der maßgebende Verkehrsindikator für die Bestimmung der Qualität der Koordinierung. Die erwartete Verminderung der Reisezeit für den Radverkehr hat das Potenzial, die Attraktivität des Fahrrads als tägliches oder gelegentliches Verkehrsmittel auf den Sitraffic-SiBike-Streckenzügen durch wettbewerbsfähigere Reisezeiten im Gegensatz zum mV zu erhöhen. Entsprechend werden die Auswirkungen auf die Verkehrseffizienz des mV anhand der Auswertung der Reisezeiten auf dem koordinierten Streckenzug definiert.

2.4 Versuchsplanung

Für die Evaluierung des Radverkehrsablaufs der drei Untersuchungsfälle wurden Versuchsradfahrer mit Smartphones ausgestattet, die ihre Geschwindigkeit und Position erfassen. Zuerst wird die Mindestanzahl von Fahrten in jedem Untersuchungsfall definiert. Diese muss ausreichend groß sein, um einen statistisch signifikanten Vergleich zwischen den Untersuchungsfällen zu gewährleisten. Definiert wird die notwendige Anzahl durch die Anwendung der Hybridmethode (Quiroga und Bullock 1998). Für den benutzerdefinierten Fehler $\varepsilon = 0,5 \text{ km/h}$ bei der Bestimmung der mittleren Reisegeschwindigkeiten ergibt sich in Bezug auf das 95-%-Konfidenzintervall eine erforderliche Mindestanzahl von 91 Hin- und Rückfahrten bei jedem Untersuchungsfall. Die minimale Grenze für die Reisegeschwindigkeiten der Radfahrer wurde anhand des Oppenlander-Ansatzes (Oppenlander 1976) für die Berechnung des \bar{R} -Faktors auf 8 km/h (um den Einfluss von Wartezeiten an lichtsignalisierten Knotenpunktzufahrten zu berücksichtigen) und die maximale Grenze auf 19 km/h festgelegt.

Alle 16 Versuchsradfahrer in Untersuchungsfall 1 waren Mitarbeiter der Stadt Marburg, die sich freiwillig am Versuch beteiligten. Für die Untersuchungsfälle 2 und 3 im Oktober wurden 15 Versuchsradfahrer eingestellt. Dazu kamen noch drei Mitarbeiter der Stadt Marburg, die sich

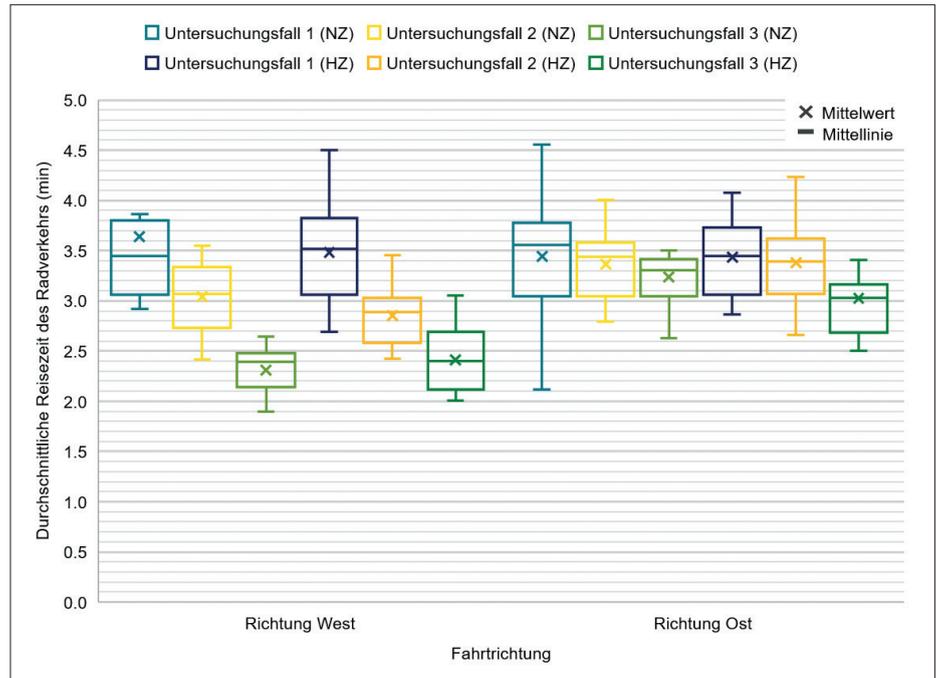


Bild 4: Durchschnittliche Reisezeit des Radverkehrs

wiederum freiwillig an der Untersuchung beteiligten. Alle Versuchsradfahrer benutzen für die Ermittlung der GPS-Trajektorien ihre persönlichen Smartphones oder GPS-Tracker. Vor dem Beginn der Versuche wurde eine Einführungsveranstaltung organisiert, um die Probanden über den Versuchsablauf und ihre Rolle zu informieren. Die Proberadfahrer wurden darauf hingewiesen, sich während der Versuche gesetzeskonform zu verhalten und den Pilotstreckenzug während der Untersuchungszeiträume kontinuierlich zu befahren. Zudem sollten die Versuchsradfahrer entlang der Strecke nicht ohne Grund anhalten, damit bei der Bearbeitung der GPS-Trajektorien keine zusätzliche Halte fälschlicherweise einzelnen Knotenpunkten zugeordnet werden. Ferner soll ausgeschlossen werden, dass Radfahrer durch zusätzliche Halte die Koordinierung der Lichtsignalsteuerung verpassen, was zu einer Verschlechterung der Ergebnisqualität führen würde. Die Radfahrer sollten die Pilotstrecke mit normalem Tempo befahren und dabei so viele Hin- und Rückfahrten wie möglich abschließen.

Zur Ermittlung der mV-Reisezeiten wurde ein Kennzeichenerfassungssystem basierend auf Infrarot-Kameras verwendet. Die erfassten Kennzeichen werden am Erfassungszeitpunkt verschlüsselt und vom Rechner gespeichert. Die ANPR-Kameras wurden an verschiedenen Messquerschnitten platziert, um auf Basis erfasster Kenn-

zeichen Reisezeiten zwischen den jeweiligen Querschnitten zu ermitteln. Die erfassten Kennzeichen werden dabei irreversibel verschlüsselt und nach der Ermittlung der Reisezeiten gelöscht. Bild 2 zeigt die Positionen der ANPR-Standorte auf der Pilotstrecke.

3 Ergebnisse

Für die Analyse wurden die erhobenen GPS-Trajektorien der Versuchsradfahrer und die erfassten Reisezeiten für den mV und den ÖPNV berücksichtigt. Die Ergebnisse der jeweiligen Verkehrsteilnehmergruppen werden sowohl für die Nebenverkehrszeit als auch für die Hauptverkehrszeit pro Fahrtrichtung (Bild 2) differenziert präsentiert. Um die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen den Untersuchungsfällen zu bewerten, wird der Tukey-Kramer-Test (Kramer 1956, 1957) angewandt.

3.1 Beeinflussung auf den Radverkehr

Zunächst wird untersucht, welchen Einfluss Sitraffic SiBike und die Koordinierung auf den Radverkehr hat. Die Beeinflussung auf den Radverkehr wird mittels der GPS-Trajektorien der Fahrten der Versuchsradfahrer ermittelt. Zuerst wird die durchschnittliche Anzahl an Radfahrerhalten pro Fahrt für jeden Versuchsradfahrer und für

Tabelle 2: Reisezeiten des Radverkehrs Tukey-Kramer-Test

Reisezeiten des Radverkehrs Tukey-Kramer-Test			
Nebenverkehrszeit			
Fahrtrichtung	Vergleich		Unterschied der Mittelwerte
	Fall A	Fall B	
West	1	2	-16,5 %
	1	3	-36,6 %*
	2	3	-24,0 %*
Ost	1	2	-2,3 %
	1	3	-6,0 %
	2	3	-3,7 %
Hauptverkehrszeit			
West	1	2	-18,0 %*
	1	3	-30,8 %*
	2	3	-15,6 %*
Ost	1	2	-1,6 %
	1	3	-11,9 %
	2	3	-10,4 %

*signifikant unterschiedlich ($\alpha = 0.05$)

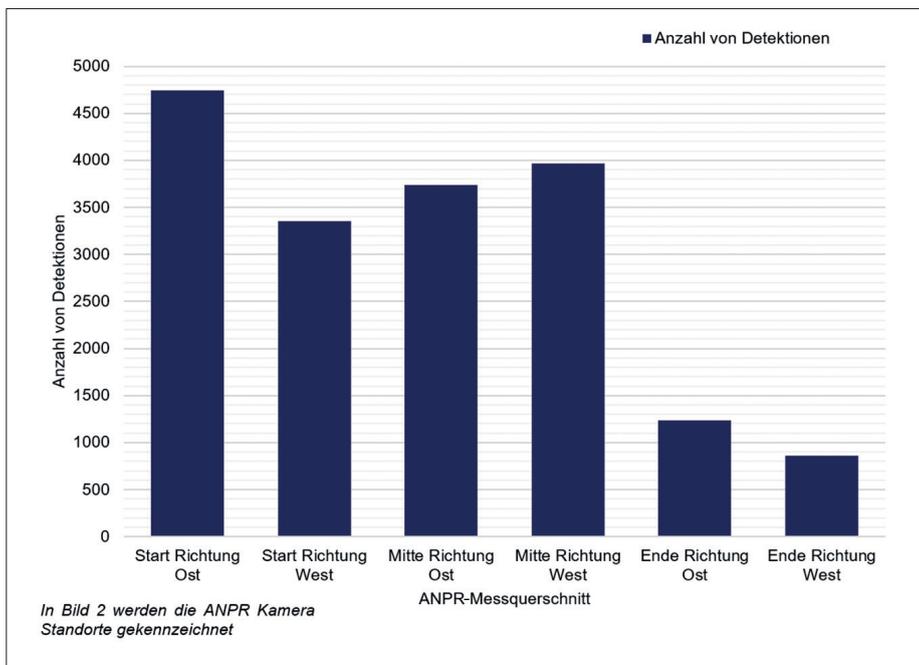


Bild 5: Anzahl von Detektionen an den ANPR-Standorten

alle Knotenpunktzufahrten berechnet. Insgesamt haben alle Versuchsradfahrer 1.689 Hin- und Rückfahrten zurückgelegt. Bild 3 stellt den Vergleich zwischen den durchschnittlichen Halten für jeden Untersuchungsfall während der Nebenverkehrszeit (NZ) und der Hauptverkehrszeit (HZ) dar.

Die Ergebnisse in Bild 3 zeigen, dass die allgemeine Reduzierung des Halteanteils

auf der Pilotstrecke hauptsächlich durch die Reduzierung des Halteanteils in Fahrtrichtung West erreicht wird. Gleichzeitig zeigt Untersuchungsfall 2 im Gegensatz zu Untersuchungsfall 3 während der Nebenverkehrszeit eine größere Reduzierung der durchschnittlichen Anzahl von Radfahrerhalten pro Fahrt. Die Untersuchungsfälle 2 und 3 beeinflussen die durchschnittliche

Anzahl von Radfahrerhalten pro Fahrt während der Hauptverkehrszeit gleichmäßig positiv.

Tabelle 1 umfasst die Ergebnisse des Tukey-Kramer-Tests zwischen allen Untersuchungsfällen.

Wegen großer Varianzen werden teilweise auch große absolute Differenzen zwischen den Mittelwerten der Untersuchungsfälle als nicht signifikant unterschiedlich bewertet. Wichtig ist hier anzumerken, dass für die Fahrtrichtung OW die durchschnittliche Anzahl von Radfahrerhalten pro Fahrt in Untersuchungsfall 3 während der Hauptverkehrszeit und der Nebenverkehrszeit signifikant verbessert wird. Dasselbe gilt auch dann, wenn die Werte der durchschnittlichen Anzahl von Radfahrerhalten pro Fahrt für beide Fahrtrichtungen zusammen betrachtet werden. Einzige Ausnahme stellt der Vergleich der Untersuchungsfälle 2 und 3 während der Nebenverkehrszeit dar (Tabelle 1).

Im Folgenden werden die Reisezeiten für den Radverkehr auf der Pilotstrecke evaluiert. Diese werden für jede Fahrtrichtung getrennt erfasst. Der Start der Strecke befindet sich kurz vor der lichtsignalisierten Knotenpunktzufahrt 1, das Ende kurz nach der Knotenpunktzufahrt 6. Bild 4 stellt den Vergleich zwischen den Reisezeiten für den Radverkehr während der zwei Messperioden dar.

Tabelle 2 umfasst die Ergebnisse des Tukey-Kramer-Tests zwischen allen Untersuchungsfällen für die Reisezeiten des Radverkehrs.

Die Reisezeiten werden nur für die Fahrtrichtung West signifikant reduziert. Der höchste Anteil der Verbesserung der Reisezeiten für beide Messperioden wird in Untersuchungsfall 3 beobachtet. In der Nebenverkehrszeit der Fahrtrichtung West zeigt Untersuchungsfall 3 eine statistisch signifikante Verbesserung der Reisezeiten im Vergleich zu den Untersuchungsfällen 1 und 2. Das heißt, dass nur Sitraffic SiBike auf dieser Fahrtrichtung die Reisezeiten für die Radfahrer signifikant verbessert hat.

3.2 Motorisierter Verkehr

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ANPR-Kennzeichenerfassungen dargestellt. Die erfassten Kennzeichen der betrachteten Messstrecke wurden verarbeitet, um Kennzeichenpärchen zu bestimmen. Die Pärchen wurden dann gefiltert, um sehr

schnelle oder sehr langsame Fahrzeuge zu entfernen, deren Fahrverhalten nicht dem Gesamtkollektiv entsprechen. Für die Bewertung der Verkehrssituation für den mV werden die gemessenen Reisezeiten der ANPR-Messstrecken genutzt.

Das Diagramm in Bild 5 vergleicht die Anzahl an Kennzeichendetektionen an allen Messquerschnitten der Pilotstrecke.

Unter Berücksichtigung der Detektionsraten wird festgestellt, dass der höchste Anteil des mV die Strecke zwischen den Knotenpunkten 1 und 4 befährt. Für die Bewertung der Verkehrssituation für den mV werden die gemessenen Reisezeiten der ANPR-Messstrecken genutzt. Das Diagramm in Bild 6 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen erfassten Reisezeiten für den mV auf der Gesamtstrecke für beide Fahrtrichtungen.

Tabelle 3 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen erfassten Reisezeiten für den mV auf der Gesamtstrecke für beide Fahrtrichtungen

Für die Teilstrecke Ende – Mitte (Fahrtrichtung West) und die Gesamtstrecke in Fahrtrichtung West wurden entweder keine Kennzeichenpärchen während der Nebenverkehrszeit (Untersuchungsfall 1) gefunden oder die gefundenen Kennzeichenpärchen mussten herausgefiltert werden.

Die Verschlechterung der Reisezeit für die Gesamtstrecke in Fahrtrichtung Ost während der Nebenverkehrszeit wird als statistisch nicht signifikant evaluiert. Wichtig ist auch, dass Untersuchungsfall 3 in der Hauptverkehrszeit nicht signifikant günstiger für die mV-Reisezeiten gegenüber Untersuchungsfall 2 war. Ausnahmen in diesem Fall sind nur die Ergebnisse der Messstrecken Start – Mitte (Fahrtrichtung Ost) und Mitte – Start (Fahrtrichtung West). Für die Hauptverkehrszeit wurden die mV-Reisezeiten bei den Untersuchungsfällen 2 und 3 auf der Messstrecke Ende – Mitte und der Gesamtstrecke in Fahrtrichtung West signifikant schlechter. Trotzdem betrifft diese Verschlechterung nur eine geringere Anzahl von Fahrzeugen unter Berücksichtigung der Detektionsrate (Bild 5) am ANPR-Standort Ende Richtung West. Da die Teilstrecke Start – Mitte in beiden Fahrtrichtungen von deutlich mehr Fahrzeugen befahren wird als die Teilstrecke Mitte – Ende, ist eine Auswertung der Verkehrseffizienz für den mV mithilfe der erfassten Kennzeichenpärchen und unter Berücksichtigung der aggregierten Zeitverluste bzw. Zeitgewinne auf den Teilstrecken sowie der Gesamtstrecke angemessen. Tabelle 4 zeigt

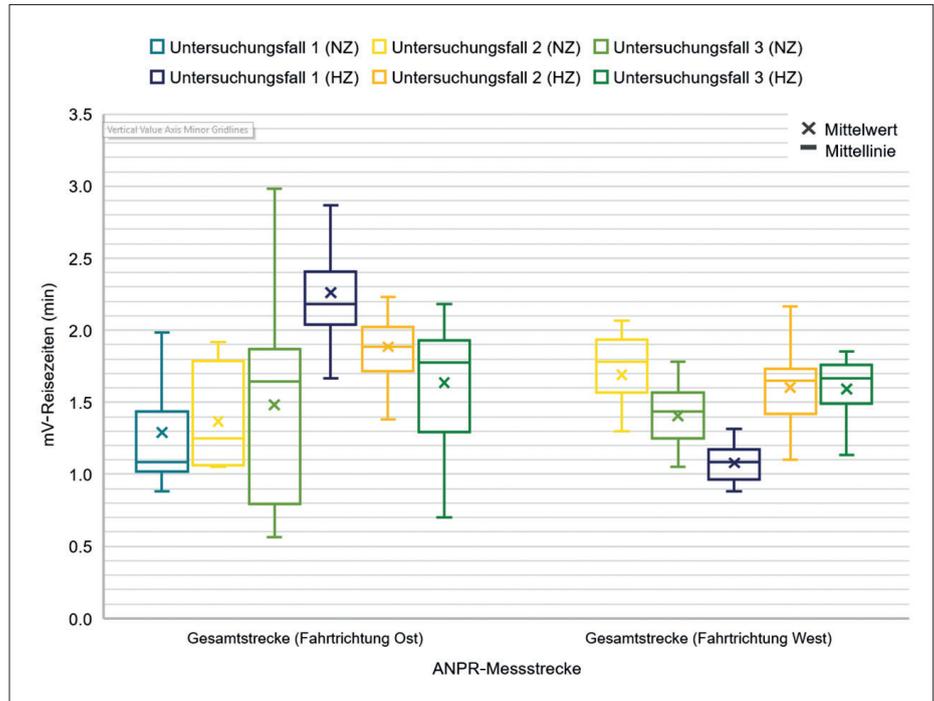


Bild 6: Durchschnittliche mV-Reisezeiten

Reisezeiten mV (Tukey-Kramer-Test)						
Messstrecke	Fall-Vergleich					
	Nebenverkehrszeit			Hauptverkehrszeit		
	1 mit 2	1 mit 3	2 mit 3	1 mit 2	1 mit 3	2 mit 3
Start-Mitte	+273,70 %*	+167,20 %*	-28,50 %*	-15,80 %*	-35,90 %*	-23,80 %*
Mitte-Ende	-60,20 %*	-61,40 %*	-3,00 %	-7,30 %	-9,40 %	-2,30 %
Gesamtstrecke Fahrtrichtung Ost	+5,90 %	+14,90 %	+8,50 %	-16,60 %*	-27,70 %*	-13,30 %
Ende-Mitte	keine Daten		-4,70 %	+29,80 %*	+30,10 %*	+0,20 %
Mitte-Start	-54,60 %*	-63,30 %*	-19,20 %*	-5,90 %	-17,20 %*	-12,00 %*
Gesamtstrecke Fahrtrichtung West	keine Daten		-16,80 %*	+47,60 %*	+46,50 %*	-0,70 %

*signifikant unterschiedlich ($\alpha = 0.05$)

Tabelle 3: Mittlere mV-Reisezeiten Tukey-Kramer-Test

die aggregierten Reisezeiten für die betrachteten Messstrecken.

In Fahrtrichtung West wurden für die Gesamtstrecke und die Teilstrecke Ende – Mitte in der Nebenverkehrszeit keine Kennzeichenpärchen identifiziert. Die aggregierte Änderung der Reisezeit berücksichtigt für die Nebenverkehrszeit nur die Teilstrecke Mitte – Start. Nach Auswertung der Änderung der Reisezeiten für alle erfassten Kennzeichenpärchen auf der Gesamtstrecke in beiden Fahrtrichtungen sowie deren Teilstrecken ergibt sich eine Verbesserung der mV-Reisezeiten. Während der Hauptverkehrszeit

beträgt diese in Fahrtrichtung Ost in Untersuchungsfall 3 gegenüber Untersuchungsfall 1 -33,2 %, in Fahrtrichtung West -6,5 %.

3.3 Öffentlicher Personennahverkehr

Für die Evaluierung der Auswirkungen von Sitraffic SiBike auf den ÖPNV wurde das gleiche Vorgehen wie beim mV verwendet. Die ANPR-Kameras haben während der Messperioden die Kennzeichen der ÖPNV-Fahrzeuge erfasst. Diese wurden in der Kennzeichendatenbank identifiziert und getrennt bearbeitet. Trotz der langen Takt-

Aggregierte Änderung der mV-Reisezeit						
Fahrtrichtung	Fall-Vergleich					
	Nebenverkehrszeit			Hauptverkehrszeit		
	1 mit 2	1 mit 3	2 mit 3	1 mit 2	1 mit 3	2 mit 3
Ost	+144,6 %	+145,8 %	-24,1 %	-15,3 %	-33,2 %	-21,3 %
West	-54,6 %	-63,3 %	-19,2 %	+7,3 %	-6,5 %	-9,7 %

Tabelle 4: Aggregierte Änderung der mV-Reisezeit

zeiten der ÖPNV-Linien auf der Pilotstrecke wurde nur eine kleine Stichprobe von ÖPNV-Kennzeichenpärchen erfasst. Aus diesem Grund konnte keine Beurteilung der statistischen Signifikanz durchgeführt werden. Im Vergleich zu Untersuchungsfall 1 zeigen sich in den Untersuchungsfällen 2 und 3 die ÖPNV-Reisezeiten für die Gesamtstrecke in Fahrtrichtung West verbessert und in Fahrtrichtung Ost verschlechtert. In Fahrtrichtung West sind die Reisezeiten in Untersuchungsfall 2 um 18 % und in Untersuchungsfall 3 um 7 % reduziert worden. Gleichzeitig sind die Reisezeiten für den ÖPNV in Untersuchungsfall 2 um 56 % und um 12 % in Untersuchungsfall 3 gestiegen. Allgemein sind die Ergebnisse für den ÖPNV in Untersuchungsfall 3 im Gegensatz zu Untersuchungsfall 2 verbessert. Allerdings ist aufgrund der kleinen Stichprobe eine deutliche Aussage über die Auswirkungen von SiBike auf den ÖPNV-Betrieb nicht möglich.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Evaluierung von Sitrtraffic SiBike zeigt für die zwei Messperioden der drei Untersuchungsfälle folgende Ergebnisse.

- Die Ergebnisse für die Versuchsradfahrer während der zwei Messperioden zeigen, dass die durchschnittliche Reisezeit mit Sitrtraffic SiBike für die Fahrtrichtung West statistisch signifikant gegenüber allen anderen Untersuchungsfällen verbessert wurde (-36,6 % gegenüber der Verkehrssituation ohne Sitrtraffic SiBike mit der bestehenden Koordinierung für den mV, -24,0 % gegenüber einer statischen Koordinierung für Radfahrer ohne Sitrtraffic SiBike für die Nebenverkehrszeit und -30,8 % gegenüber der Verkehrssituation ohne Sitrtraffic SiBike mit der bestehenden Koordinierung für den mV, -15,6 % gegenüber einer statischen Koordinierung für Radfahrer ohne Sitrtraffic SiBike für die Hauptverkehrszeit). In

Fahrtrichtung Ost ergaben sich für die Reisezeit des Radverkehrs keine signifikanten Änderungen.

- Die Ergebnisse für den mV während der Hauptverkehrszeit zeigen, dass durch die Anpassung der Lichtsignalsteuerung die durchschnittliche mV-Reisezeit auf der Gesamtstrecke in Fahrtrichtung Ost signifikant um -27,7 % gegenüber der Verkehrssituation ohne Sitrtraffic SiBike mit der bestehenden Koordinierung für den mV verbessert wurde. Gleichzeitig wurde die durchschnittliche mV-Reisezeit in Fahrtrichtung West signifikant um +46,5 % schlechter. Diese Änderung betrifft jedoch die Teilstrecke Ende - Mitte (Fahrtrichtung West), die von der geringsten erfassten Anzahl von Fahrzeugen befahren wird. Unter Berücksichtigung der aggregierten Reisezeit für die Fahrtrichtung West wurde diese mit SiBike um -6,5 % reduziert.
- Gleichzeitig wurden in beiden Fahrtrichtungen die Verbesserungen der durchschnittlichen mV-Reisezeiten (jeweils -13,3 % für Fahrtrichtung Ost und -0,7 % für Fahrtrichtung West) mit Sitrtraffic SiBike gegenüber einer statischen Koordinierung für Radfahrer ohne Sitrtraffic SiBike als nicht statistisch signifikant bewertet.

Die Ergebnisse des ersten Pilotversuchs von Sitrtraffic SiBike in Marburg zeigen, dass die Anzahl an Halten und die Reisezeiten für den Radverkehr auf der Pilotstrecke von Marburg erfolgreich reduziert werden konnten, ohne gleichzeitig die allgemeine Verkehrssituation für den mV signifikant zu verschlechtern. Aus der Analyse der erhobenen Verkehrsdaten für die Verkehrsteilnehmer ergibt sich ein breites Spektrum von Reisezeiten und der durchschnittlichen Anzahl von Halten innerhalb des koordinierten Streckenzuges. Dies ist hauptsächlich von den unterschiedlichen dynamischen Fahrverhalten der Radfahrer, von der Lichtsignalsteuerung und von der beste-

henden Verkehrssituation für den mV am Streckenzug abhängig. Aus diesem Grund ergeben sich unterschiedliche Voraussetzungen auf potenzielle zukünftige Sitrtraffic SiBike-Streckenzüge. Der Pilotversuch liefert jedoch erste positive Ergebnisse für den Einsatz von Priorisierungsmaßnahmen für Radfahrer an lichtsignalisierten Zufahrten. Weitere Pilotversuche an unterschiedlichen Teststrecken mit anderen verkehrlichen Merkmalen und Einschränkungen sind für die Zukunft geplant, um die Auswirkungen von Sitrtraffic SiBike zu evaluieren, Einsatz-einschränkungen zu definieren und potenzielle Erweiterungsmöglichkeiten des Systems zu erkennen.

Literaturverzeichnis

B a u m a n n, F. (2016): Berner Ampeln stehen auf grün. <http://www.velojournal.ch/>.- Aktualisierungsdatum: 4.4.2017

CROW Fietsberaad (2010): Rotterdam first with green LED wave for cyclists. <http://www.fietsberaad.nl/>. - Aktualisierungsdatum: 4.4.2017

Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (2007): Amsterdam führt Grüne Welle für den Radverkehr ein. <https://nationaler-radverkehrsplan.de/>. - Aktualisierungsdatum: 4.4.2017

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). FGSV Verlag, Köln

H o e g h, N. (2007): Green waves for cyclists in Copenhagen Denmark - Copenhagen. Workshop at Velocity, München

K r a m e r, C. Y. (1956): Extension of multiple range tests to group means with unequal numbers of replications. In: *Biometrics*, 12. Jg., JSTOR Nr. 3: S. 307-310

K r a m e r, C. Y. (1957): Extension of multiple range tests to group-correlated adjusted means. *Biometrics*, 13. Jg., JSTOR Nr. 1: S. 13-18

M e n s i k, K.; Beyer, F. (2013): Koordinierung von Lichtsignalanlagen für den Radverkehr. *Straßenverkehrstechnik*, 57, 10, Kirschbaum Verlag, Bonn, S. 621-627

O p p e n l a n d e r, J. C. (1976): Sample size determination for travel time and delay studies. *Traffic Engineering*, 46, 9, Institute of Traffic Engineers, S. 25-28

Q u i r o g a, C.; B u l l o c k, D. (1998): Determination of sample sizes for travel time studies. *ITE Journal on the Web*, 68, 8, Institute of Traffic Engineers, S. 92-98

Siemens AG (2017): Weltpremiere in Marburg - Präsentation der Grüne-Welle-App für Radfahrer. www.siemens.com/presse/sibike. - Aktualisierungsdatum: 04.05.2017.

T w a d d l e, H.; G r i g o r o p o u l o s, G. (2016): Modeling the speed, acceleration and deceleration of bicy-clists for microscopic traffic simulation. *Transportation Research Record (TRR)*, Journal of the Transportation Research Board, 2587, Transportation Research Board, S. 8-16