

Heather Kaths, Andreas Keler, Georgios Grigoropoulos, Klaus Krämer,
Fritz Busch

RadOnTime: Wirkungen von Restzeitanzeigen auf den Radverkehr

Steuerung des Radverkehrs

Kurzfassung

In Zukunft ist mit einem weiter steigenden Anteil von Radfahrern am Verkehrsaufkommen zu rechnen. Der nationale Radverkehrsplan 2020 (NRVP) prognostiziert eine mögliche Steigerung des Radverkehrs von 11 % im Jahr 2013 auf 16 % im Jahr 2020 in Bezug auf die Anzahl der Wege im städtischen Umfeld. Im Sinne einer nachhaltigen und gesundheitsfördernden Mobilität ist diese Entwicklung zu begrüßen und soll durch eine Steigerung der Attraktivität des Radverkehrs und die effiziente und sichere Führung aller Verkehrsteilnehmenden weiter gefördert werden.

RadOnTime adressierte eine Steigerung der Attraktivität und Effizienz des Radverkehrs an signalisierten Knotenpunkten bei gleichzeitiger Gewährleistung der Sicherheit von Radfahrern. Diese Ziele sollten mit Hilfe eines speziell auf Radfahrer abgestimmten Steuerungsansatzes erreicht werden. Restzeitanzeigen an Lichtsignalanlagen sollten Radfahrern dabei helfen, ihre Geschwindigkeit taktisch anzupassen und Haltevorgänge zu vermeiden. Gleichzeitig sollten Rotlichtverstöße und sicherheitskritische Situationen mit im Konflikt stehenden Verkehrsströmen durch diese Maßnahme reduziert werden.

Im Rahmen von RadOnTime wurden die sicherheitsbezogenen und verkehrlichen Wirkungen der Steuerungsmaßnahmen im realen Verkehr und mithilfe einer Fahrradsimulator-Studie erforscht. Die Restzeitanzeigen wurden an ausgewählten Versuchsknotenpunkten in München versuchsweise installiert. Mithilfe von Bewegungsabläufen aller Verkehrsteilnehmenden, die automatisiert aus Videodaten extrahiert werden können, wurden Effizienz- und Sicherheitsindikatoren ausgewertet und eingehend evaluiert. Die Akzeptanz und Bewertung verschiedener Ausprägungen der Maßnahme durch unterschiedliche Radfahrertypen wurden mithilfe einer begleitenden Fahrradsimulator-Studie untersucht.

Durch eine prototypische Umsetzung sollte eine Reduktion der Rotlichtverstöße und der Wartezeiten von Radfahrenden um jeweils 10 % nachgewiesen werden. Damit einhergehend sollte die Zahl der sicherheitskritischen Situationen signifikant reduziert werden.

Ausgangssituation, Projektidee und Zielsetzung

In Zukunft ist mit einem weiter steigenden Anteil von Radfahrenden am Verkehrsaufkommen zu rechnen. So ergab die jüngste Erhebung im Rahmen von Mobilität in Deutschland (MiD) eine Steigerung der mit dem Rad zurückgelegten Personenkilometer um 37 % von 2002 bis 2017. Im urbanen Raum fällt diese Steigerung noch deutlicher aus. Der nationale Radver-

kehrsplan 2020 (NRVP) prognostiziert eine mögliche Steigerung des Radverkehrs von 11 % im Jahr 2013 auf 16 % im Jahr 2020 in Bezug auf die Anzahl der Wege im städtischen Umfeld. Im Sinne einer nachhaltigen und gesundheitsfördernden Mobilität ist diese Entwicklung zu begrüßen und soll durch eine Steigerung der Attraktivität des Radverkehrs und die effiziente und sichere Führung aller Verkehrsteilnehmenden weiter gefördert werden. Eine dieser Möglichkeiten für die Attraktivitätssteigerung können Restzeitanzeigen für den Radverkehr sein. Vor diesem Hintergrund wurde mit der Landeshauptstadt München diskutiert, inwiefern Restzeitanzeigen einen Einfluss auf Radfahrende haben, da es hierzu auch einen Mangel an verfügbarer Literatur gab.

Das Projekt wurde durch den Lehrstuhl für Verkehrstechnik der TU München initiiert und reiht sich an Vorarbeiten zur Radverkehrsforschung am Lehrstuhl. Eine am Lehrstuhl bestehende Methodik der Verkehrsdatenerhebung via Videoaufzeichnung wurde in diesem Projekt jeweils vor und nach der Installation der Restzeitanzeigen eingesetzt. Hierfür wurden von der Landeshauptstadt München die Möglichkeiten geschaffen, drei Restzeitanzeigen in der bestehenden Verkehrsinfrastruktur zu implementieren. Zusätzlich wurde ein bestehender Fahrradsimulator für die Erhebung der, vor allem qualitativen, Daten genutzt. Dies konnte einen Vergleich unterschiedlicher Arten und Ausführungen von Restzeitanzeigen für Radfahrer in einer virtuellen Umgebung ermöglichen.

Restzeitanzeigen existieren weltweit für zu Fuß Gehende und in manchen, vor allem asiatischen Ländern für den motorisierten Verkehr. Eine Reduzierung von Rotlichtverstößen durch den Einsatz von Restzeitanzeigen wird in mehreren Studien dokumentiert (Newton et al. (1997); Limanond, Prabjapok, Tippayawong (2010), Rijavec, Zakovšek, Maher (2013); Van Haperen et al. (2015); Wang, Tian (2010); Zhou, Roshandeh, Zhang (2014)) gezeigt.

Restzeitanzeigen für den Radverkehr existieren nur vereinzelt wie beispielsweise in den Niederlanden, dem Land mit dem höchsten Radverkehrsanteil in Europa. Dort werden vermehrt Restrotanzeigen speziell für Radfahrende installiert. Ziel ist es auch hier, die Rotlichtverstöße zu reduzieren und den Komfort zu erhöhen. Nach den ersten Installationen in Amsterdam im Jahr 2005 wurden Untersuchungen durchgeführt, welche eine Reduktion der Rotlichtverstöße um zunächst 7 % zur Folge hatten (Wiersma 2006). Zur Erhöhung der Sichtbarkeit wurde ein weiterer Zähler im unteren Signalgeber für Radfahrende angebracht, wodurch eine Reduktion um weitere 10 % erzielt wurde. Außerdem wurden die Anzeigen von Radfahrenden als sehr positiv bewertet (Wiersma 2006). Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Empfehlung ausgesprochen, weitere Anlagen mit den Anzeigen auszustatten. Da in den Niederlanden auch Restzeitanzeigen in Verbindung mit verkehrsabhängiger, regelbasierter Steuerung eingesetzt werden, sind zum Teil deutliche Sprünge in der Anzeige sichtbar (Koonce 2011). Um diesen Effekt visuell abzumildern, werden neben der Anzeige von Sekunden als Zahlenwerte auch umlaufende Kreise aus LEDs angewendet.

Zwischen 2009 und 2010 wurden in Amsterdam sechs weitere Restrotanzeigen eingesetzt (Jakobs, Laan 2011). Davon waren drei Restrotanzeigen mit dem umlaufenden Kreis aus LEDs ausgestattet, während die übrigen Anlagen explizite Zahlenwerte anzeigen. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung der Rotlichtverstöße von 13-14 % an Querungsstellen mit angezeigten Zahlenwerten. Für die umlaufenden Kreise konnte dagegen keine Reduzierung der Rotlichtverstöße ermittelt werden. Zusätzlich zu den Messungen wurde eine Benutzerakzeptanzuntersuchung durchgeführt. Radfahrende bewerten das System positiv und behaupten, dass sowohl sie selbst als auch die übrigen Radfahrenden nicht mehr während der Sperrzeit die Stra-

ße kreuzen und dass Restrotanzeigen die Verkehrssicherheit erhöhen. 83 % der Teilnehmenden gaben an, dass der Einsatz von Restzeitanzeigen einen positiven oder sehr positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit habe und 41 % kamen zu dem Schluss, dass die Wartezeit an den Knotenpunktzufahrten nach dem Einsatz von Restzeitanzeigen kürzer geworden sei. Außerdem bevorzugten die Radfahrenden das Anzeigeprinzip mit Zahlenwerten gegenüber dem umlaufenden Kreis aus LEDs.

Die Nutzung eines Fahrradsimulators für verkehrstechnische Aufgaben ist, die frühen Ansätze von Sun und Qing (2017) ausgenommen, neuartig, vor allem in Bezug auf die Interaktion zu unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden und der Radfahrenden zueinander.

Es fehlte an praktischen verkehrstechnischen Untersuchungsmethoden, vor allem für die Wirkung von Restzeitanzeigen auf den Radverkehr im urbanen Raum in Deutschland. Zusätzlich fehlte es an nationalen Richtlinien für den Einsatz von Restzeitanzeigen. Neben der Untersuchung der Verkehrseffizienz und -sicherheit vor und nach der Installation der Restzeitanzeigen für den Radverkehr, wird auch die Akzeptanz der, mitunter unterschiedlichen, Designs der Restzeitanzeige mit einem Fahrradsimulator evaluiert. Hier sollten neben einem feststellbaren Nutzen für den Radverkehr auch die Wünsche von Proband*innen hinsichtlich der Verständlichkeit und effizienten Wahrnehmung der vermittelten dynamischen Information berücksichtigt werden. Fahrradsimulatoren wurden bisher nicht primär für die Untersuchung von Restzeitanzeigen genutzt.

Dies alles wurde innerhalb des Projektes RadOnTime untersucht, durch allgemeine Methodik beschrieben und als Pilotanwendungen realisiert.

Es wurde erhofft, durch das Projekt Effizienz- und Attraktivitätssteigerungen bei gleichzeitiger Gewährleistung der Sicherheit von Radfahrenden durch Nutzung von Restzeitanzeigen an signalisierten Knotenpunkten festzustellen und zu quantifizieren. Grundlegend sollte durch die Auswertung der aus Videos extrahierten Trajektorien und der Proband*innentrajektorien der Simulatorfahrten signifikante Änderungen der Rotlichtverstöße und Wartezeiten festgestellt werden. Außerdem sollten verschiedene Ausprägungen der installierten Restzeitanzeigen (auch in der virtuellen Umgebung des Fahrradsimulators) in Bezug auf ihre Akzeptanz durch Radfahrende evaluiert werden. Darauf aufbauend wurde auch erhofft, neue Erkenntnisse zur Eignung von Restzeitanzeigen in bestimmten Szenarien zu gewinnen, wie beispielsweise die Einflüsse von Zufahrtstyp, verkehrsabhängiger Steuerung, ÖPNV-Priorisierung oder der Position der Restzeitanzeige.

Projektverlauf

Das Projekt wurde durch wissenschaftliche Mitarbeitende und studentische Hilfskräfte des Lehrstuhls für Verkehrstechnik an der TU München und durch Mitarbeitende des Kreisverwaltungsreferats der Landeshauptstadt München durchgeführt.

Es gab weitere Vernetzungen zur TESIS GmbH für die technische Realisierung der Szenarien im Fahrradsimulator und mit der RCE systems s.r.o. für die Extraktion und Aufbereitung der Radfahrertrajektorien. Die drei Restzeitanzeigen wurden beim Hersteller, der AVT STOYE GmbH, durch die Landeshauptstadt München beschafft. Anschließend wurden die drei Restzeitanzeigen an drei Münchner Knotenpunkten durch die Landeshauptstadt München installiert.

Die Landeshauptstadt München hat den Zugang zu Verkehrszählungs- und Signalsteuerungsdaten ermöglicht und ebenso Drehgenehmigungen an drei untersuchten Knotenpunkten gefördert.

Die Zielgruppe des Projektes waren Kommunen und private Planungsbüros mit Interesse an innovativen Tools für die Planung und Realisierung neuer, effizienter und sicherer Radverkehrsinfrastruktur, vor allem im urbanen Raum. Restzeitanzeigen können als Unterstützung der Effizienz der bestehenden und geplanten Radverkehrsinfrastruktur gesehen werden. Die indirekte Zielgruppe sind die Radfahrenden selbst, für die die Restzeitanzeigen eine Komfortsteigerung beim Radfahren ermöglichen sollen.

Die Zielgruppe der Kommunen und Firmen wurde unter Einbeziehung erster Ergebnisse aus Trajektorienauswertung und Simulatorstudien indirekt in das Forschungsvorhaben einbezogen.

Außerdem erfolgte eine Umfrage vor Ort mit Radfahrenden im Untersuchungsgebiet Milbertshofener Straße, nachdem sie die Restgrünanzeige genutzt hatten. Des Weiteren konnte die Abendzeitung München eine Online-Umfrage zur Relevanz der in der Milbertshofener Straße installierten Restgrünanzeige machen (Abendzeitung München 2018) mit einem aktuellen Ergebnis (September 2019), dass 81 % es für sinnvoll halten („Ja, ich finde das sinnvoll!“), 15 % für nicht sinnvoll („Nein, Countdown-Ampeln bringen gar nichts!“) und 4 %, die dazu keine Meinung haben.

Die Auswahl der Untersuchungsknotenpunkte wurde ausschließlich in Kooperation mit der Landeshauptstadt München getroffen. Zusätzlich konnte der Fahrradsimulator auf dem Münchner Streetlife Festival 2018 der Öffentlichkeit vorgestellt werden und auf Grundlage erster Testfahrten für den Einsatz durch Proband*innen technisch verbessert werden.

Die Methodik des Projektes RadOnTime besteht aus drei voneinander abhängigen Bestandteilen. Der erste Bestandteil der Methodik beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Bewertungsindikatoren. Hier werden verschiedene Kenngrößen spezifiziert, um die verkehrlichen und sicherheitsbezogenen Wirkungen von Restrot- und Restgrünzeitanzeigen zu ermitteln. Generell sollten diese zwei Anzeigetypen bei der Untersuchung unterschieden werden. Der Grund dafür ist, dass die in der Realität implementierten Restgrünzeitanzeigen durch erfasste reale Radfahrertrajektorien und Proband*innentrajektorien aus den Simulatorfahrten untersucht werden, und sich deswegen mehr Bewertungskenngrößen ergeben als bei den nur in der Simulatorumgebung implementierten Restrotanzeige. Die Bewertungskenngrößen zur Analyse von Restgrünanzeigen sind in Tab. 1 für den Radverkehr und für den Verkehr von Kraftfahrzeugen aufgezeigt.

Tab. 1:
Bewertungskenngrößen
zur Analyse von
Restgrünzeitanzeigen

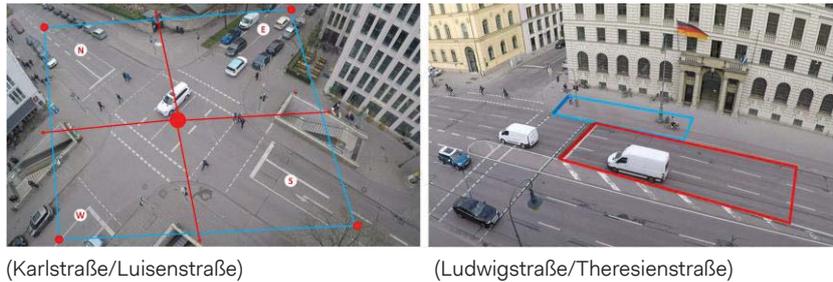
		Bewertungskenngröße	Einheit	Definition
Effizien z		Angehaltene RadfahrerInnen	[%]	Halt: Geschwindigkeit < 0.2 m/s für mindestens eine Sekunde
		Wartezeit	[s]	Die Dauer eines Haltevorgangs (Geschwindigkeit < 0.2 m/s)
Radverkehr	Sicherheits	Rotlichtverstöße		Überfahren der Haltelinie während der Sperrzeit
		<ul style="list-style-type: none"> • Direkt nach Beginn der Sperrzeit • Verzögerte Rotlichtverstöße 	[%] [%]	<ul style="list-style-type: none"> • In den ersten 10 Sekunden der Sperrzeit • Nach der Durchführung eines vollständigen Haltevorgangs
	Sicherheits	Geschwindigkeit	[m/s]	Geschwindigkeiten der nicht angehaltenen RadfahrerInnen beim Überfahren der Haltelinie vor Beginn der Sperrzeit (je eine Sekunde)
		Kritische Interaktionen		Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei interagierenden Verkehrsteilnehmern (unterschiedlichen Konstellationen von Interaktionen sind definiert)
		<ul style="list-style-type: none"> • Abstand • Geschwindigkeitsdifferenz 	[m] [m/s]	
	Bremsvorgänge	[m/s ²]	Bremsvorgänge der RadfahrerInnen in den fünf Sekunden vor der Beendung des Bremsvorgangs (je eine Sekunde)	
Kraftfahrzeuge	Sicherheits	Rotlichtverstöße		Überfahren der Haltelinie während der Sperrzeit
		<ul style="list-style-type: none"> • Direkt nach Beginn der Sperrzeit • Verzögerte Rotlichtverstöße 	[%] [%]	<ul style="list-style-type: none"> • In den ersten 10 Sekunden der Sperrzeit • Nach der Durchführung eines vollständigen Haltevorgangs
	Sicherheits	Geschwindigkeit	[m/s]	Geschwindigkeiten der nicht angehaltenen Fahrzeuge beim Überfahren der Haltelinie vor Beginn der Sperrzeit (je eine Sekunde)
		Kritische Interaktionen		Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei interagierenden Verkehrsteilnehmern (vier unterschiedliche Konstellationen von Interaktionen)
		<ul style="list-style-type: none"> • Abstand • Geschwindigkeitsdifferenz 	[m] [m/s]	
	Bremsvorgänge	[m/s ²]	Bremsvorgänge der Fahrzeuge in den fünf Sekunden vor der Beendung des Bremsvorgangs (je eine Sekunde)	

Tab. 2:
Zwei Bewertungskenn-
größen zur Analyse von
Restrotanzeigen

		Bewertungskenngröße	Einheit	Definition
Radverkehr		Angehaltene RadfahrerInnen	[%]	Halt: Geschwindigkeit < 0.2 m/s für mindestens eine Sekunde
		Rotlichtverstöße		Überfahren der Haltelinie während der Sperrzeit
	<ul style="list-style-type: none"> • Losfahren bevor Beginn der Freigabezeit 	[%]	<ul style="list-style-type: none"> • Innerhalb der Sekunde vor Beginn der Freigabezeit 	

Der zweite Bestandteil der Methodik beschäftigt sich mit der Auswertung von Trajektoriendaten, die aus Videoaufnahmen extrahiert wurden. Für die Aufzeichnung der Videos wurden Kameras an einem Mast (Milbertshofener Straße) und an Gebäuden (Karlstraße/Luisenstraße, Theresienstraße/Ludwigstraße) installiert. Um die Manöver und Zufahrt der Verkehrsteilnehmenden zu bestimmen, wurden die Knotenpunkte anhand von einem Punkt in der Mitte des Knotenpunkts und weiteren Punkten an jeder Zufahrt geteilt. Abb. 1 (links) zeigt beispielhaft die Aufteilung des Knotenpunkts Karlstraße/Luisenstraße. Polygone zur Identifikation relevanter Radfahrender für die Auswertung der Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsprozesse und des Zeitverlusts zu Beginn der Freigabezeit werden wie in Abb. 1 (rechts) dargestellt erzeugt. Die Geschwindigkeit sowie der Anteil von Rotlichtverstößen und angehaltenen Verkehrsteilnehmenden werden mithilfe der Haltelinie (vordere Kante des Polygons) analysiert.

Abb. 1:
Beispielhafte Aufteilung
des Knotenpunkts in
Zufahrten und Polygone
zur Datenauswertung.



Quelle: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.

Die Trajektorien werden mittels eines Zeitstempels mit einer Datenbank der Signalzustände aller Signalgeber am Knotenpunkt verknüpft. Dies ermöglicht die Auswertung von Rotlichtverstößen, Geschwindigkeiten beim Überfahren der Haltelinie kurz vor Beginn der Sperrzeit und Wartezeiten.

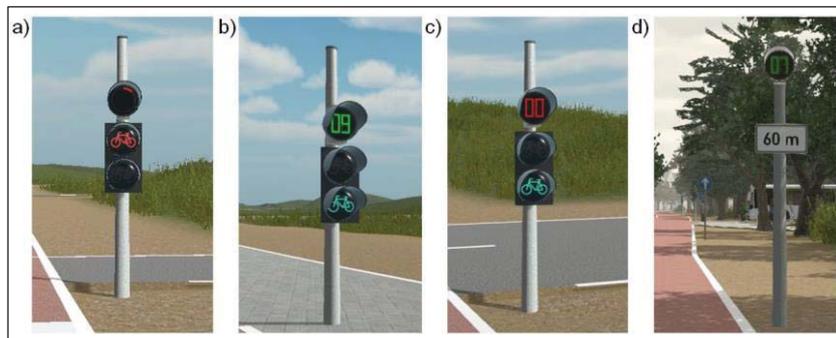
Die ermittelnden Manöver der Verkehrsteilnehmenden wurden verwendet, um die nach links oder rechts abgebogenen Personen aus der Analyse auszuschließen. Abbiegemanöver erhöhen signifikant die Wahrscheinlichkeit eines Rotlichtverstößes im Vergleich zu geradeaus fahrenden Radfahrenden (Twaddle, Busch 2019).

Der dritte Bestandteil der Methodik fokussiert auf die Simulatorstudien und subjektive Bewertungen. Ziel der Simulator-Studien ist es, die Präferenzen von Radfahrenden bezüglich der Art und Ausprägung von Restzeitanzeigen sowie Wirkungen auf die Verkehrssicherheit zu untersuchen. Zur Auswahl der Untersuchungsszenarien für die Fahrradsimulator-Studien wurden Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sowie Erfahrungen in anderen Ländern (hauptsächlich Niederlande und Dänemark) berücksichtigt. Die folgenden vier Arten von Restzeitanzeigen wurden zur Untersuchung ausgewählt:

- Typ 1: Restrotzeitanzeige mit Information zur verbleibenden Sperrzeit dargestellt mit Kreis.
- Typ 2: Restgrünzeitanzeige mit Information zur verbleibenden Grünzeit dargestellt mit Ziffer.
- Typ 3: Restrotzeitanzeige mit Information zur verbleibenden Sperrzeit dargestellt mit Ziffer.
- Typ 4: Restgrünzeitanzeige mit Information zur verbleibenden Grünzeit 60 m vor der Kreuzung.

Abb. 2 zeigt diese vier Typen in der virtuellen Umgebung der Simulatorfahrten, die mithilfe der Software DYNAanimation visualisiert wurden. Man erkennt hier, dass die Anzeigen im Vergleich zur Realität vergrößert wurden. Der Grund für die Vergrößerung ist die aus den genutzten Bildschirmen eingeschränkte Auflösung, die ein Erkennen von LED-Ziffern in der virtuellen Umgebung bei gleichem Abstand wie in der Realität unmöglich macht.

Abb. 2:
Ausprägungen der
Restzeitanzeige in der
Simulationsumgebung



a) Typ 1, b) Typ 2, c) Typ 3, d) Typ 4.

Quelle: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.

Die Farbe der Restzeitanzeige wird an die Signalphase angepasst. Basierend auf Erfahrungen einer Vorstudie wurden Typ-4-Anzeigen mit einem „60 m“-Schild ergänzt, um zu verhindern, dass Proband*innen an der Anzeige anhalten. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Restzeitinformaton wurden in unterschiedlichen Verkehrssituationen untersucht, welche anhand der drei folgenden Parameter definiert waren:

- Verkehrszustand des motorisierten Verkehrs
- Verbleibende Restgrün- bzw. Restrotzeit
- Abstand des Radverkehrs zum Knotenpunkt (Typ 4)

Darauf basierend wurde eine Teststrecke mit der Simulationssoftware SUMO (Behrisch et al. 2011) aufgebaut, wobei die Simulation der Umgebung mithilfe der Software DYNAnimation erstellt wurde. Die Teststrecke misst beinahe 3,5 km und beinhaltet nach einer ersten Kurve, die als kurze Einfahrstrecke zur Gewöhnung an das Fahrrad und den Simulator dient, 25 Kreuzungen, die nacheinander durchfahren werden. Sechs dieser Knotenpunkte sind in jeweils doppelter Ausführung den Untersuchungsknotenpunkten aus der Feldstudie nachempfunden. Die übrigen 19 Knotenpunkte sind fiktional und möglichst einfach gehalten.

Das Projekt RadOnTime gliederte sich in fünf Arbeitspakete. Im ersten Arbeitspaket Grundlagenanalyse wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik durchgeführt und die Untersuchungsszenarien entworfen. Es folgte das Arbeitspaket Methoden zur Analyse des Radverkehrs, in dem die Weiterentwicklung von Methoden zur Datenerhebung und Analyse des Verhaltens von Radverkehr in verschiedenen Szenarien stets im Mittelpunkt stand.

Anschließend wurden im nächsten Arbeitspaket die Versuche im Testfeld durchgeführt. Dabei wurden Videodaten in HD-Qualität mit einem portablen System über Beobachtungszeiträume von mehreren Tagen erhoben. Dabei wurde jeweils ein Tag für die Vorher- und ein Tag für die Nachher-Studie pro Standort aufgezeichnet.

Im vierten Arbeitspaket wurden die Steuerungsmaßnahmen im Testfeld eingerichtet. Die Restzeitanzeigen wurden dabei in die Signalsteuerungen der drei Testknotenpunkte eingebunden.

Das fünfte Arbeitspaket bestand aus der Durchführung der Fahrradsimulator-Studien. Die Maßnahme wurde in der virtuellen Umgebung mit einer repräsentativen Stichprobe von Probanden untersucht. Die Probanden lieferten die qualitativen Daten aus einer Befragung, die die Grundlage für die Auswertung der Akzeptanz darstellen.

Das sechste Arbeitspaket beinhaltete die Evaluierung der Maßnahmen, um damit eindeutige Aussagen über die Wirksamkeit und die Effekte von Restzeitanzeigen zu treffen.

Im finalen Arbeitspaket Ergebnisverbreitung wurde, basierend auf den Ergebnissen der Auswertungen, eine umfassende Bewertung der im Projekt untersuchten Maßnahme geliefert. Diese Erkenntnisse werden in aktuellen und kommenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorgestellt.

Ergebnisse und Projekterfolge

Die Fragestellungen des Projektes RadOnTime konnten innerhalb der Projektlaufzeit nur teilweise beantwortet werden. Die Laufzeit des Projekts musste wegen technischen Problemen mit dem Einrichten der Steuerungsmaßnahme im Feld um neun Monate kostenneutral verlängert werden. Es wurde geplant, die Wirkungsevaluierung der Maßnahme in der Form eines Leitfadens zu präsentieren. Hierbei sollten die Randbedingungen bzw. Anforderungen für die erfolgreiche Umsetzung von Restzeitanzeigen beschrieben werden. Obwohl wertvolle Erkenntnisse sowohl zum technischen Einsetzen der Maßnahme im Feld als auch zu den Wirkungen der Restzeitanzeigen auf die verkehrliche Sicherheit und Effizienz im Projekt gewonnen wurden, war die Stichprobe von Versuchsknotenpunkten nicht ausreichend groß, um allgemeine Randbedingungen zu definieren. Es wurde in Abstimmung mit der Projektbegleitung des Nationalen Radverkehrsplans beschlossen, keinen Leitfaden zur Verfügung zu stellen. Stattdessen wurden die gewonnenen Erkenntnisse ausführlich in Form von wissenschaftlichen Veröffentlichungen dokumentiert, um einen Leitfaden zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen.

Die ersten Erkenntnisse zu Fahrradsimulatorstudien mit Proband*innen wurden dokumentiert. Hier zeigten sich die Grenzen und Möglichkeiten der Datengenerierung durch Probanden, insbesondere wie die Sichtbarkeiten der virtuellen Umgebung sich von der Realität unterscheiden. Innerhalb der Proband*innenstudien wurde vor allem die Akzeptanz und die Attraktivität der Maßnahmen bewertet. Die erarbeitete Methodik kann als eine prototypische Umsetzung von Probandenstudien mit einem Fahrradsimulator gesehen werden (Kaths et al. 2020), die den Fokus auf der Evaluierung von Restzeitanzeigen hat. Des Weiteren kann der Entwurf der Strecken für Simulatorfahrten als Kombination von realen und fiktiven Knotenpunkten als ein neuartiger und reproduzierbarer methodischer Ansatz gesehen werden (Keler et al. 2019).

Im Projekt konnte eine Evaluierung von Restzeitanzeigen durchgeführt werden, ohne jedoch eine Lösung von Problemen bei dem Einsatz von Restzeitanzeigen vorzuschlagen. Durch die im Projekt präsentierte Methodik können nur Vorschläge zur Lösung von Problemen gemacht werden.

Es zeigte sich vor allem eine Steigerung der Attraktivität und eine Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die mögliche Einführung einer Restrotanzeige. Im Falle von Restgrünanzeigen können teilweise weniger Konflikte an der Knotenpunktfläche festgestellt werden (Konfliktdichte wird geringer). Generell werden Restzeitanzeigen mit Sekunden gegenüber den im Kreis angeordneten LED-Punkten von Münchner Radfahrern bevorzugt.

Die technische Einrichtung solcher Anlage gestaltet sich kostenintensiv und aufwändig wie im Beispiel für die Stadt München. Der Grund hierfür resultiert aus längeren Zeiträumen der Verkehrsdatenerhebung und der zeitglei-

chen Präsenz einer Mitarbeiter*in der Stadt München vor Ort, um mögliche technische und sicherheitsrelevante Probleme sicherzustellen.

Bei der Auswertung der extrahierten Videotrajektorien zeigte sich, dass an allen Knotenpunkten die Häufigkeit von kritischen Interaktionen (minimalen Abstand $\leq 0,2$ m) mit der Einführung von Restgrünzeitanzeigen reduziert wurde. Hierbei ist vor allem die Häufigkeit von kritischen Interaktionen zwischen zwei Radfahrenden zurückgegangen.

Ob diese Auswirkungen an anderen Knotenpunkten mit ähnlichen Merkmalen zu erwarten sind, ist anhand des Datensatzes schwierig zu bewerten. Dafür wäre es notwendig, Daten an mehreren Knotenpunkten über einen längeren Zeitraum zu erheben. Das hängt jedoch von der Bereitschaft der Stadt oder Gemeinde ab, diese Untersuchungen zu unterstützen. Für jede Erhebungsperiode mit einer Restgrünzeitanzeige im Feld war die Präsenz eines/einer Mitarbeiter*in der Stadt München vor Ort notwendig, um sicherzustellen, dass keine erheblichen Probleme (technische oder sicherheitsrelevante) auftauchen würden. Dies ist kostenintensiv und aufwändig für die Stadt.

Zu den Problemen gehören mögliche Zeitsprünge und Unzuverlässigkeit bei der Restzeitanzeige aufgrund von nicht vorhersagbaren Anforderungen und Abmeldungen bei einer vorliegenden ÖPNV-Beschleunigung vor Ort.

Bereits vor der Installation stand nach Einschätzung des Kreisverwaltungsreferats fest, dass Restgrünzeitanzeigen an verkehrsabhängig oder mit ÖPNV-beschleunigt gesteuerten Lichtsignalanlagen (oder eine Kombination aus beiden) nicht praktikabel umsetzbar sein würden.

Bei verkehrsabhängigen LSA müsste in die Zukunft geblickt werden können, ob und wann beispielsweise ein Fahrzeugpulk abreißt und die Lichtsignalanlage über ihre Schleifendetektoren feststellt, dass kein Fahrzeug mehr kommt. In diesem Fall schaltet das Grün früher ab, verglichen mit dem Fall, dass noch Fahrzeuge kommen würden.

Ebenso reagieren die Lichtsignalanlagen sehr schnell, wenn Bus oder Tram ein Funksignal senden. Grünzeiten werden gegebenenfalls sofort abgebrochen oder verlängert. Eine vernünftige Vorhersage und Anzeige der verbleibenden Grünzeit ist mit den technischen Möglichkeiten einer LSA nach der fachlichen Einschätzung des Kreisverwaltungsreferats München nicht möglich. Dieses Erkenntnis ist jedoch auch ein wichtiges Ergebnis innerhalb dieses Forschungsprojekts. Dieselben Überlegungen gelten übrigens auch für die Anzeige einer Wartezeit bei Rot, denn die Zeitsprünge, die bei Grünzeiten entstehen, wirken gleichermaßen auf das komplementäre „Rot“.

Dieses Sprungverhalten des Countdown-Zählers könnte im Zusammenhang mit Restzeitanzeigen zu unsicheren Verkehrssituationen führen, wenn zum Beispiel Radfahrende bei der Annäherung an die Lichtsignalanlage angezeigt bekommen, sie hätten noch 15 Sekunden „Grün“ und sich Ihre Aufmerksamkeit bei der weiteren Annäherung an den Signalquerschnitt – im Bewusstsein, sicher über „Grün“ zu fahren – vom Signalgeber abwendet. Findet an diesem Punkt aufgrund der Verkehrsabhängigkeit eine plötzliche Umschaltung statt, könnten Radfahrende, die dies nicht bemerken, womöglich bei „Rot“ in die Kreuzung einfahren und gefährdet sein.

Ähnlich verhält es sich mit Wartezeitanzeigen bei „Rot“. Auch hier kann es unvorhersehbar zur plötzlichen Verlängerung einer Wartezeit kommen und Verkehrsteilnehmende könnten aufgrund eines zuvor als endend wahrgenommenen Countdowns zu früh und damit noch bei Rot in die Kreuzung einlaufen oder -fahren.

Neben diesen Sicherheitsbedenken, ist noch anzuführen, dass springende Countdown-Angaben Verwunderung bei den Verkehrsteilnehmenden auslösen dürften, vor allem wenn die dahinterliegende Ursache der ÖPNV-Beschleunigung oder verkehrsabhängigen Steuerung nicht offensichtlich für Passanten sein sollte. In der Folge ist mit einer abnehmenden Akzeptanz der Anzeige zu rechnen, wenn Rotzeiten sich verlängern oder Grünzeiten sich verkürzen. Zeitsprünge konterkarieren in gewisser Weise Sinn und Zweck von Restzeitanzeigen, nämlich der verlässlichen Vorhersage verbleibender Freigabe- bzw. Sperrzeiten.

Countdown-Zähler sind aus Sicht der Straßenverkehrsbehörde des Kreisverwaltungsreferats in München nur dann praktikabel und können nur dort sicher eingesetzt werden, wo die Freigabezeiten unveränderlich sind, also beispielsweise bei Lichtsignalanlagen mit Festzeitsteuerung oder an verkehrsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen, wo die verkehrsabhängige Schaltweise die zur Anzeige kommenden Freigabezeiten nicht beeinflusst.

Des Weiteren kann man sagen, dass sich eine Reduktion von Rotlichtverstößen nach Installation von Restgrünanzeigen nur für einen kleinflächigen Knotenpunkt feststellen ließen, nicht jedoch bei den beiden anderen Untersuchungsgebieten (Kaths, Grigoropoulos, Krämer 2019). Dies zeigt den hohen Einfluss der Ausprägung eines jeden Entwurfs-elementes der Verkehrsinfrastruktur auf die sinnvolle Implementierung einer Restzeitanzeige im urbanen Raum.

Die Fahrradsimulatorstudien in diesem Projekt dienten größtenteils der Beschaffung subjektiver Bewertungen der Restzeitanzeigen. Da es im Feld nicht möglich war, unterschiedliche Ausprägungen der Restzeitanzeigen zu erproben, wurden die Präferenzen und Reaktionen von Personen in der simulierten Umgebung erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Restgrün- und Restrotzeitanzeigen von den Proband*innen gut angenommen wurden. Eine Verminderung des Anteils von Rotlichtverstößen wurde sowohl mit Restrotzeitanzeigen als auch mit Restgrünzeitanzeigen erzielt, wobei Restgrünanzeigen eine größere und statistisch signifikante Verbesserung bewirkten. Obwohl die Fahrradsimulatorstudie interessante Erkenntnisse zu den Präferenzen der Proband*innen geliefert hat, würden einige Verbesserungen die Auswertung der Bewegungsabläufe der Proband*innen in der simulierten Umgebung optimieren.

Das Projekt erlaubte es, eine Methodik zu entwickeln, um die Implementierung von Restzeitanzeigen für unterschiedliche signalisierte Knotenpunkte objektiv und subjektiv zu evaluieren. Aus realen Beobachtungen können unterschiedliche Konflikt- oder Interaktionsarten abhängig von unterschiedlichen Fahrtrichtungen errechnet und klassifiziert werden. Hieraus lassen sich sowohl kleine Unterschiede und, im Falle der Milbertshofener Straße, große Unterschiede in der räumlichen Verteilung von Konflikten je Untersuchungsknotenpunkt vor und nach der Implementierung der Restzeitanzeigen feststellen. Dies ist aber auch auf die stark reduzierte Anzahl an Radfahrenden nach der Implementierung der Restzeitanzeige in der Milbertshofener Straße zurückzuführen.

Aus den Simulatorstudien geht noch weiter hervor, dass ein substantieller, signifikanter Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein einer Restrotzeitanzeige und dem Vorkommen von Rotlichtverstößen der Proband*innen besteht. An allen simulierten Knotenpunkten mit einer Restrotzeitanzeige kann eine Verringerung des Anteils von Rotlichtverstöße um 35,3 % im Vergleich zu Knotenpunkten ohne Restrotzeitanzeigen beobachtet werden. Die Art der Restrotzeitanzeige (Zahl oder Kreis) hat dabei keinen nennenswerten

Einfluss auf das Vorkommen von Rotlichtverstößen. Dies zeigt das Potential von Studien mit Fahrradsimulatoren.

Mit den Simulatorstudien können zusätzlich Daten durch begleitende Interviews der Probanden erhoben werden, um so das persönliche Empfinden der untersuchten Restzeitanzeigen zu untersuchen. Damit wurden neue Möglichkeiten geschaffen, Restzeitanzeigen für Radfahrende eingehend und umfassend zu evaluieren.

Die erzielten Ergebnisse haben große Relevanz für die Praxis, in der Hinsicht, dass der Nutzen von Restzeitanzeigen für Radfahrende im urbanen Raum erstmals abgeschätzt wurde. Es zeigte sich, dass Radfahrende Sekundenanzeigen bei den Restzeitanzeigen bevorzugen und eine Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit nicht an allen Entwurfs-elementen möglich ist. Hinzu kommt die oft mit zeitlichem und monetärem Aufwand verbundene Implementierungsphase, in der vor allem im urbanen Raum mögliche Probleme schnell ausgeschlossen werden sollten.

Die Erfahrungen, die im Zuge von RadOnTime gesammelt wurden, könnten in mögliche zukünftige Richtlinien für den Entwurf von Lichtsignalprogrammen für Restzeitanzeigen einfließen, insbesondere zu den Hinweisen zur technischen Einrichtung dieser Anlagen.

Neben der Auswertung von extrahierten Trajektorien (aller Verkehrsteilnehmenden) basierend auf realen Daten vor und nach der Implementierung einer Restzeitanzeige, können unterschiedliche Modelle von Restzeitanzeigen auch aus der Egoperspektive eines Radfahrenden in einer virtuellen Umgebung subjektiv evaluiert werden. So kann eine effektive und schnelle Abschätzung der Relevanz der Implementierung von Radverkehrsinfrastruktur erfolgen.

Auf Ebene der Kommunen, der Länder und des Bundes ergeben sich viele neuartige methodische Ansätze bei der Umsetzung regionaler und nationaler Radverkehrsinfrastrukturprojekte durch die Nutzung von Fahrradsimulatoren. Vor allem die Implementierung von Verkehrssteuerungsmaßnahmen kann erlebbar evaluiert werden und so eine Brücke schaffen zwischen dem subjektiven Erleben durch Bürger*innen und den validierten Ergebnissen aus realen Verkehrsbeobachtungen.

Durch die Auswertung der Umfragedaten als Teil der Proband*innenstudien konnte ein Einblick in die subjektive Einschätzung von Proband*innen gemacht werden. Auf Grund der Stichprobe von 32 Teilnehmenden, kann man diese nach Bubb (2003) als valide bezeichnen. Es ist jedoch absehbar, dass für eine umfassende Evaluierung von unterschiedlichen Restzeitanzeigen für Radfahrende eine größere Stichprobe benötigt wird. Des Weiteren konnte nicht festgestellt werden, ob animierte Unfallabläufe oder Bewegungsrestriktionen durch Hindernisse sinnvoll sind oder eher die Simulatorfahrt durch unnötige Ablenkung behindern. Es ist auch noch ungeklärt, wie die in der virtuellen Umgebung vergrößerten Restzeitanzeigen den Vergleich mit der Realität verfälschen.

Außerdem kann man für die Videotrajektorienanalyse sagen, dass es leider nicht möglich war, anhand der erhobenen Daten Rückschlüsse bezüglich des Einflusses der Restgrünzeitanzeige auf den motorisierten Verkehr zu ziehen (für die Untersuchungsgebiete in der Theresienstraße und in der Luisenstraße). In diesem Bezug wäre ein größerer Datensatz mit Trajektorien von mehreren Tagen über einen längeren Zeitraum nach der Installation der Restzeitanzeigen notwendig, um die normalen Schwankungen im Verkehrszustand auszugleichen.

Ausblick

Diese Ergebnisse wurden bereits auf mehreren nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt und bieten eine Grundlage für weitere Forschungsansätze.

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit zeigt sich in der Vielzahl an gewonnenen Erkenntnissen aus den durchgeführten Trajektorienanalysen und Simulatorstudien. Eine Besonderheit bei den Simulatorstudien war dabei das kombinierte Netz aus realen und fiktiven Knotenpunkten, dass das reale Untersuchungsgebiet hochgenau abbildet. Grundlage dafür sind reale Daten.

Als weiteren Erfolg kann man die generierten Trajektorien aus der Videoaufnahme von den drei untersuchten Knotenpunkten bezeichnen, die für zukünftige Forschungsansätze nutzbar sind. Die erfassten Daten aus den Videoaufzeichnungen und den Simulatorstudien können mit weiteren neuartigen Machine-Learning-Ansätzen noch weiter untersucht werden.

Es bedarf weiterer Forschung, um die Reproduzierbarkeit der Ansätze auch für andere Fallstudien und Untersuchungsgebiete zu belegen. Restzeitanzeigen könnten dabei auch für andere Verkehrsteilnehmende getestet werden wie beispielsweise für zu Fuß Gehende. Des Weiteren könnte man noch andere Szenarien für die Fahrradsimulatorstudien implementieren. Das Zusammenspiel der Szenarien mit einer variierenden Fahraufgabe in der Simulatorstudie könnte darüber Aufschluss geben, ob Zeitdruck, beispielsweise auf der Fahrt zur Arbeit mit Verspätung, eine Rolle bei der Variabilität der Ergebnisse spielt.

Zusätzlich könnte man die Visualisierung von Zwischenzeiten untersuchen, zunächst virtuell und anschließend mit einer umprogrammierten Restzeitanzeige.

Es ist auch darauf hinzuweisen, dass im Feldversuch je Knotenpunkt nur ein Tag untersucht wurde. Um jedoch Gewöhnungseffekte erfassen zu können, bedarf es daher längerfristiger Beobachtungen.

Literatur

- Abendzeitung München (2018): Projekt der TU München testet erstmals Countdown-Ampeln. AZ, 10.07.2018, <https://bit.ly/2Dha0CB> (Abruf am 03.08.2020)
- Behrisch, Michael; Bieker, Laura; Erdmann, Jakob; Krajzewicz, Daniel (2011): SUMO – Simulation of Urban MObility – an Overview. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL'11) (c): 63–68.
- Bubb, H. (2003): Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen. Winner, Hermann (Hrsg.): Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Düsseldorf: VDI Verlag, 26-39.
- Grigoropoulos G., Keler A., Kathes H., Spangler M., Busch F. (2019) Using Geodata for Simulating Urban Traffic - Current Research in the Field of Traffic Engineering and Control. In: Kolbe TH, Bill R, Donaubauer A (eds) Geoinformationssysteme 2019 – Beiträge zur 6. Münchner GI-Runde. Berlin/Offenbach: Wichmann, pp. 45-49.
- Jakobs E.; Laan N. (2011); Wachttijdvoorspellers fietsers in Amsterdam, Amsterdam, 2011.
- Kathes, Heather; Grigoropoulos, Georgios; Krämer, Klaus (2019): Green signal countdown timers for bicycle traffic – Results from a field study. Cycling Research Board 2019, 2019. <https://mediatum.ub.tum.de/1534367>
- Kathes, Heather; Keler, Andreas; Kathes, Jakob; Busch, Fritz (2019): Analyzing the behavior of bicyclists using a bicycle simulator with a coupled SUMO and DYNA4 simulated environment. SUMO User Conference 2019, EasyChair, 2019, 99–205. <https://doi.org/10.29007/dcmp> (Abruf am 30.06.2020)
- Kathes, Heather; Keler, Andreas; Hosseini, Seyed Abdollah; Grigoropoulos, Geor-

- gios; Kath, Jakob (2020): *Fahrradsimulator: Anwendungsorientierter Erfahrungsbericht zu Aufbau und Nutzung*. 2020 NRVP (kommende Veröffentlichung), 2020.
- Keler, Andreas; Grigoropoulos, Georgios; Kath, Heather; Krämer, Klaus; Kath, Jakob; Spangler, Matthias; Busch, Fritz (2019): Designing maps with fictional and real road intersections for the evaluation of countdown timer displays for bicyclists. *Proceedings of the ICA 2*, 2019, 1–5.
- Keler, Andreas; Kath, Jakob; Chucholowski, Frederic; Chucholowski, Maximilian; Grigoropoulos, Georgios; Spangler, Matthias; Kath, Heather; Busch, Fritz (2018): A bicycle simulator for experiencing microscopic traffic flow simulation in urban environments. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE, 2018, 3020-3023.
<https://doi.org/10.1109/itsc.2018.8569576> (Abruf am 30.07.2020)
- Koonce, Peter (2011): *Bicycle Countdown Signal – Time to Green*.
- Limanond, T.; Prabjabok, P.; Tippayawong, K. (2010): Exploring impacts of countdown timers on traffic operations and driver behavior at a signalized intersection in Bangkok, *Transp. policy*, vol. 17, no. 6, pp. 420–427, 2010.
- Newton, C.; Mussa, R. N.; Sadalla, E. K.; Burns, E. K.; Matthias, J. (1997): Evaluation of an alternative traffic light change anticipation system, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 29, no. 2, pp. 201–209, 1997.
- Rijavec, R.; Zakovšek, J.; Maher, T. (2013): Acceptability of countdown signals at an urban signalized intersection and their influence on drivers behaviour, *PROMET-Traffic&Transportation*, vol. 25, no. 1, pp. 63–71, 2013.
- Ruf, Mara (2021): *Wirkungen von Restzeitanzeigen auf den Radverkehr – eine Fahrradsimulatorstudie*. Heureka'21 (FGSV), 2021.
- Sun, C., Qing, Z. (2017): Design and Construction of a Virtual Bicycle Simulator for Evaluating Sustainable Facilities Design. *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, 2017.
- Twaddle, Heather, Busch, Fritz (2019): Binomial and Multinomial Regression Models for Predicting the Tactical Choices of Bicyclists at Signalised Intersections. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 60: 47–57.
- Van Haperen, W.; Pirdavani, A.; Brijs, T.; Bellemans, T. (2015): Evaluating Traffic Safety and Performance Effects of Countdown Timers on Signalized Intersections: A Driving Simulator Study, 2015.
- Wang, X.; Tian, Z. (2010): Pedestrian delay at signalized intersections with a two-stage crossing design, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, no. 2173, pp. 133–138, 2010.
- Wiersma, Ane (2006): *Werkgroep Verkeerslichten Amsterdam: Memorandum evaluation waiting time predictor*, Amsterdam, 2006.
- Zhou, B.; Roshandeh, A. M.; Zhang, S. (2014): Safety Impacts of Push-Button and Countdown Timer on Nonmotorized Traffic at Intersections, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014