
Verkehrssysteme im digitalen Wandel

vorgelegt von: Simon Julian Koch

Abgabedatum: 2020-05-18

Hausarbeit im Modul "Gesellschaftliche Strukturen im digitalen Wandel"

Zeitraum: Wintersemester 2019/2020

Dozenten: Prof. Dr. H.G. Gräbe

K. P. Kleemann

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	3
2. Grundlagentechnologie: Erfassen von Verkehrsdaten	5
punktuelle Erfassung von außen	
kontinuierliche Erfassung von innen	
3. Grundlagentechnologie: Datenübertragung an die Verkehrsteilnehmer	7
Begriffe an Lichtsignalanlagen	
Traffic Message Channel (TMC)	
4. Koordinierte Lichtsignalsteuerung (“Grüne Welle”)	9
Planung einer grünen Welle ausgehend vom physikalischen Wellenmodell	
Probleme dieses Modells in realeren Situationen	
Lösungsmöglichkeiten für nicht dynamische Schaltungen	
5. Verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung	13
für den allgemeinen Kraftfahrzeugverkehr	
für einzelne Verkehrsteilnehmer	
6. mögliche Verbesserungen durch eine umfassende Digitalisierung	16
Szenario einer perfekten Vernetzung	
frühzeitige Information über Ampelphasen in den Fahrzeugen	
Selbst-Steuerung	
koordinierte Selbst-Steuerung	
Benötigte Infrastruktur	
7. Bewertung der Systeme	22
Vorteile im Vergleich zur aktuellen Steuerungstechnik	
Probleme	
Vergleich der Bedeutung zum autonomen Fahren	
Fazit	
Quellenverzeichnis	25

1. EINLEITUNG

Es gibt in den Medien und im Alltag einige Diskussionen über neue digitale Systeme, auch im Straßenverkehr, die Verbesserungen bewirken sollen. Große Beispiele hierfür sind die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen oder Fahrzeugen mit Hybrid-, Wasserstoff- oder elektrischem Antrieb. Der Fokus liegt fast immer auf der Verbesserung des Fahrzeugs. Dabei ist der größte Stressfaktor beim Autofahren in Deutschland zu viel Verkehr beziehungsweise Staubbildung (Statista, 2018). Dieses Problem lässt sich aber durch eine Verbesserung der Fahrzeuge nicht bearbeiten, im Gegenteil: Steigt der Komfort der PKW zum Beispiel durch automatisiertes Fahren an, so wird sich die Zahl der Fahrten, gerade auch zu Stoßzeiten, nur noch erhöhen und das Problem verschärfen. In dieser Hausarbeit soll es also um eine Verbesserung des Straßennetzes mithilfe von digitalisierten Verkehrsleitsystemen gehen. Dabei soll die These

“Eine digitale Steuerung hat das Potential einige der größten Verbesserungen von Straßenverkehr zu bewirken.”

geklärt werden.

Die aktuell eingesetzten Technologien zur Erfassung von Verkehrsdaten sowie zur Verteilung von Informationen an die Fahrzeuge sollen in Umrissen vorgestellt werden. Ausgehend davon kann man theoretisch vorstellbare Systeme ableiten, die als technische Grundlage für die konstruierten Verkehrsleitsysteme dienen können. In ähnlicher Weise sollen die Konzepte für die Steuerung von Fahrzeugen anhand vorhandener Systeme erarbeitet werden. Anschließend werden Möglichkeiten der Verbesserung dieser Systeme durch vorgestellten digitalisierte Systeme gezeigt.

Es fällt auf, wie unterschiedlich vorhandene Straßensysteme, Steuerungen und neu entwickelte digitalisierte Systeme sind. Jedes dieser vielen Systeme ist in sich aufwändig gestaltet und bemisst die Qualität des Ergebnisses unterschiedlich. Es ist deshalb oft schwer allgemein gültige Aussagen zu treffen. Stattdessen soll der Inhalt an Beispielen

erarbeitet werden. In den einzelnen Bereichen werden einzelne Systeme so vorgestellt, dass zwar nicht die gesamte Funktionsweise im Detail erklärt wird, aber grundsätzliche Ideen klar werden. Meist gibt es ähnliche Systeme an anderen Stellen, die dieselben Grundsätze in einer deutlich anderen Weise technisch umsetzen.

Weiterhin werden sich viele Inhalte auf die Steuerung von hoch belasteten Kreuzungspunkten in Ballungsräumen beziehen. In besonders schwach belasteten Punkten sind Verbesserungen nicht notwendig und eine einfache Vorfahrtsregel reicht häufig aus. Auf Kreuzungspunkten von sehr großen Straßen wie Autobahnen wird der Verkehrsfluss nie gestoppt, sondern kann ungehindert und ohne weitere Steuerungen über Ab- und Zufahrten fließen.

2. GRUNDLAGENTECHNOLOGIE: ERFASSEN VON VERKEHRSDATEN

Um über den Verkehr zu informieren oder um Entscheidungen zur Beeinflussung des Verkehrs treffen zu können, ist eine umfassende Datengrundlage notwendig. Der Straßenverkehr ist durch eine Bewegung von vielen einzelnen, unabhängigen Fahrzeugen zwischen einem individuellen Start- und Zielort gekennzeichnet. Es gibt zwei grundsätzliche Strategien.

punktueller Erfassung von außen

Die ursprüngliche Variante ist eine Überwachung des Verkehrs durch straßenseitig installierte technische Anlagen. Die bekanntesten Beispiele sind in der Straße verlegte Induktionsschleifen, Infrarotsensoren, Radarsensoren oder Verkehrskameras (Krimmling, 2017, S.7-8). Vorteil hierbei ist, dass die Autos keinerlei technische Voraussetzungen erfüllen müssen, um erkannt zu werden. Andererseits sind die Kosten zur Installation solcher Systeme hoch und es werden nur eingeschränkte Daten erfasst. Man erhält nur Informationen über das Vorhandensein eines Fahrzeugs zu einer bestimmten Zeit (und eventuell die Geschwindigkeit) an genau dem Ort, an dem die Anlage installiert ist. Ohne extremen Aufwand lässt sich so keine flächendeckende Datengrundlage sammeln.

kontinuierliche Erfassung von innen

Eine andere Technologie wird durch den Einsatz von GPS- und GSM-Ortungsdaten (Ebers, o. J.) möglich. Unternehmen mit Fahrzeugflotten wie Verkehrs- und Logistikunternehmen können über im Fahrzeug verbaute Geräte Positionsdaten in Echtzeit an ihre Zentrale senden. Dies ermöglicht neben einer nachträglichen Analyse der Fahrt, zum Beispiel zur Verbesserung des Treibstoffverbrauchs, auch eine Möglichkeit Staus zu umfahren und

andere Probleme auf der Straße zu erkennen. Durch die vergleichsweise geringe Zahl an Fahrzeugen einer einzelnen Firma wird man aber so nie ein umfassendes Bild von der Verkehrslage bekommen.

Für Privatanutzer sind Informationen zur Verkehrslage vor allem in Navigationsgeräten von Bedeutung, deshalb gibt es von vielen großen Herstellern wie TomTom, Navigon oder Garmin Bestrebungen an gute Daten zum Verkehrsfluss zu kommen. Die verkauften Geräte können so nicht nur Daten über die Situation empfangen, sondern senden auch Daten über die aktuelle Position und Geschwindigkeit zurück. Um die Menge der Daten zu vergrößern werden teilweise noch Daten von Autoherstellern erworben, deren Fahrzeuge mit den entsprechenden Sensoren ausgestattet sind (T-Online, 2011). Eine andere Möglichkeit zur Datengewinnung, die neben oben genannten Herstellern sehr prominent von Google eingesetzt wird, ist das von Google "traffic crowdsourcing" genannte Sammeln von Bewegungsdaten von Smartphones. Jedes Handy, das die App Google Maps installiert hat, GPS- oder GSM-Ortsdaten erhält und diese für die App freigibt sendet anonymisierte Positions- und Geschwindigkeitsdaten an Google (Barth, 2009).

Auf jedem Straßenabschnitt kann die Geschwindigkeit der vielen einzelnen Geräte, und damit Fahrzeuge, mit der Höchstgeschwindigkeit verglichen werden. Durch diese Daten sowie Erfahrungswerte aus vorherigen Messungen kann eine informierte Angabe über Verzögerungen aufgrund einer breiten Datengrundlage angegeben werden (Palmer, 2014), (Barth, 2009). Durch die Nutzung der privaten Geräte der Endnutzer sind die Kosten zur Datensammlung für diese Unternehmen viel geringer als für viele einzelne Messanlagen und deckt gleichzeitig das gesamte Straßennetz ab. Dabei müssen auch lange nicht alle Fahrzeuge Daten senden, bei einer gewissen Mindestdurchdringung ist somit relativ leicht eine gute Flächenabdeckung umsetzbar.

3. GRUNDLAGENTECHNOLOGIE: DATENÜBERTRAGUNG AN DIE VERKEHRSTEILNEHMER

Alleine das Sammeln von Informationen bringt einen aber natürlich noch nicht weit, Informationen oder Anweisungen müssen natürlich noch an die Fahrzeuge übertragen werden.

Begriffe an Lichtsignalanlagen

Neben den Vorfahrtsregelungen sind Lichtsignalanlagen die wichtigsten Instrumente zum steuern von Verkehr an einzelnen Punkten. Die Lichtsignalanlage die gesamte technische Einrichtung an einem Kreuzungspunkt, der umgangssprachliche Begriff Ampel soll sich , (Krimmling, 2017, S. 3) folgend, nur auf den optischen Signalgeber, also die jeweils zueinander gehörenden farbigen Leuchten beziehen. Vom Umlauf einer Lichtsignalanlage spricht man als die Zeit vom Beginn einer Grünphase zum Beginn der nächsten beziehungsweise einem kompletten Durchlauf aller Signalbilder an einer Kreuzung.

In der Straßenverkehrsordnung (StVO) ist von einer Lichtzeichenanlage (Abkürzung LZA) die Rede, hier soll jedoch der Fachliteratur sowie technischen Richtlinien folgend der Begriff Lichtsignalanlage (Abkürzung LSA) verwendet werden (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, o. J.-a).

Traffic Message Channel (TMC)

Der Dienst Traffic Message Channel (TMC) ist eine Möglichkeit über UKW-Funkwellen Daten zur Verkehrslage an Fahrer im Straßenverkehr zu teilen.

Die zugrundeliegende Technologie Radio Data System (Abkürzung RDS) stammt bereits aus den 80-er Jahren und ermöglicht im Signal von den üblichen FM-Radiosendern weitere Informationen in einem höheren Frequenzband zu übertragen. Die Übertragungs-

geschwindigkeit beträgt circa 1187bit/s (2wcom, 2006, S. 2-3). In einzelnen Nachrichten werden immer wieder wiederholt Informationen gesendet. Typische Nachrichten enthalten Informationen über den Nachrichtensender, die auf dem Display im Auto angezeigt werden können, ermöglicht das automatische Umschalten auf Radio-Verkehrsnachrichten sowie das automatische Wechseln der Frequenz beim Übergang zwischen Sendegebietern und eben Informationen über die Verkehrslage mittels Traffic Message Channel (Wright, 1998) (2wcom, 2006).

TMC-Nachrichten enthalten Informationen über Position, Länge, Dauer und Typ eines Ereignisses. Diese Nachrichten werden von Infotainmentsystemen in Fahrzeugen beziehungsweise Navigationssystemen empfangen, die basierend auf den Behinderungen eventuelle Routenänderungen vornehmen können. Da jede TMC-Nachricht in eine RDS-Übertragung passen muss sind die Informationen sehr ungenau. Neben einer Codierung von lediglich 64000 Positionen in Deutschland ist das System auch durch eine Codierung der erwarteten Verzögerung von lediglich 3bit möglich. Dadurch können Verzögerungen nur in den Schritten 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h und den Rest des Tages angegeben werden. Trotz der sehr limitierten Übertragung ist die Bedeutung von RDS und TMC noch immer sehr hoch, da praktisch jedes moderne Infotainmentsystem diese Daten empfangen kann und quasi jeder Radiosender diese Informationen überträgt.

Heutzutage sind viele der Fahrzeuge und Geräte auch schon über das Mobilfunknetz mit dem Internet verbunden und so in der Lage deutlich genauere Informationen zu erhalten und wie im letzten Abschnitt beschrieben auch in die andere Richtung zu kommunizieren und "traffic crowdsourcing" möglich zu machen.

4. KOORDINIERTE LICHTSIGNALSTEUERUNG (“GRÜNE WELLE”)

Wie zuvor gezeigt, ist das aktuell wichtigste Mittel bei der Steuerung des Verkehr die Lichtsignalanlage. In den folgenden zwei Abschnitten geht es um spezielle Ansteuerungen dieser nach bestimmten Konzepten. Das erste Konzept erfasst eine koordinierte Steuerung, bei der die statischen Programme verschiedener Anlagen zueinander passen sollen.

Die grundlegende Idee bei der Umsetzung einer Verkehrssteuerung nach dem Modell “Grüne Welle” ist eine Steuerung von aufeinanderfolgenden Lichtsignalanlagen so, dass Fahrzeuge auf der Straße an jedem Kreuzungspunkt eine Grünphase antreffen und so im Idealfall keine Wartezeiten haben. Die erhofften Verbesserungen beziehen sich dabei auf eine verbesserte Reisegeschwindigkeit sowie eine höhere Nachhaltigkeit durch Senkung des Ausstoßes von Schadstoffen und geringe Fahrzeugabnutzung (Blaise & Kelly, 2011, S. 1-2). Das theoretische Potential zeigt zum Beispiel eine Studie zum Einsatz einer umfassenden koordinierten Ampelschaltung im Stadtteil Chorlton in Manchester, die eine Senkung von CO₂-Emissionen um 7,6%, NO_x-Emissionen um 7,5% sowie Feinstaub (nach PM₁₀-Standard) um 4,2% durch den Einsatz von entsprechend gesteuerten Lichtsignalanlagen verzeichnete. Gleichzeitig wurde die Reisezeit um 35,2% verkürzt (Blaise & Kelly, 2011, S. 7).

Planung einer grünen Welle ausgehend vom physikalischen Wellenmodell

In der einfachsten Form soll eine grüne Welle auf einer einzelnen Hauptstraße mit Kreuzungspunkten in eine Richtung und mit konstanter Fortbewegungsgeschwindigkeit betrachtet werden. In Physik wird eine periodische Welle als eine sich in Raum und Zeit ausbreitende periodische Erregung einer physikalischen Größe definiert. Die Fortbewegung

der Autos kann also nicht auf das Wellenmodell übertragen werden, da hier Körper und nicht nur Energie übertragen wird und die Autos auch keine Schwingung durchführen, sondern sich stets in einer Richtung bewegen sollen. Stattdessen kann die Schaltung der Ampeln im Wellenmodell abgebildet werden: Als Oszillatoren werden die einzelnen Ampeln betrachtet, deren Wert periodisch zwischen den Ampelphasen wechselt. Daraus ergibt sich die Periodendauer T als die Zeit vom Beginn einer Phase zum Beginn derselben Phase ein Durchgang später, in der Verkehrstechnik wird dies auch als Umlaufzeit bezeichnet. Somit ergibt sich auch die Frequenz als $f = 1/T$. Die Wellenlänge λ ist dabei der räumliche Abstand zweier identischer Phasen. Das kann im einfachsten Fall der Abstand zwischen zwei Ampeln sein, die genau gleichzeitig eine Grünphase beginnen, kann aber auch von der ersten Ampel bis zu einem Bereich zwischen zwei Ampeln gehen.

Führt man jetzt auf der leeren Straße ein Fahrzeug ein, das zum Beispiel genau zu Beginn der Grünphase von der ersten Ampel startet und genau dieser Grünphase weiter folgt, legt es während einer Zeit T eine Strecke von genau λ zurück. Damit ergibt sich als Geschwindigkeit des Fahrzeugs

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = c$$

was auch genau der Phasen- oder Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c entspricht. Nach dieser Formel geschaltete Lichtsignalanlagen führen so zu einer unterbrechungsfreien Fahrt für alle Fahrzeuge, die einmal in eine Grünphase gekommen sind. Dadurch bilden sich Gruppen von Fahrzeugen, Pulk genannt, die genau in der Grünphase der Welle fahren.

Probleme dieses Modells in realeren Situationen

Für nahezu alle reale Situationen muss man dieses Modell mindestens noch um eine zweite Fahrtrichtung ergänzen. Hier möchte man an jedem Knotenpunkt die Grünphase für beide Richtungen auch gleichzeitig schalten. Eine Idee zur Koordinierung ist das Simultansystem. Hier soll an jedem Kreuzungspunkt die Grünphase gleichzeitig sein, in der Rotphase

bewegen sich die Fahrzeuge des Pulks von einer Kreuzung auf die nächste zu. Der Abstand zweier Kreuzungen muss dann durch

$$s = v \cdot t = v \cdot T$$

gegeben sein, hängt also nur von der gewünschten Geschwindigkeit v und der Umlaufzeit T der Ampelphasen ab. Die andere Alternative ist das Alternativsystem, bei dem jede zweite Kreuzung gleichzeitig eine Grünphase hat. Damit ergibt sich ein Abstand von

$$s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot T.$$

Für den Stadtverkehr ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von $v = 50\text{km/h}$ und einer typischen minimalen Umlaufzeit von $T = 50\text{s}$ ein Abstand von fast 350m, im Simultansystem wäre es noch einmal doppelt so viel. Für eine konsequente Umsetzung müsste man alle Kreuzungen der betroffenen Hauptstraßen also hunderte Meter auseinander legen, was sicherlich nicht praktikabel ist (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, o. J.-b), (Krimmling, 2017, S. 23).

Weitere Probleme ergeben sich durch die automatische Benachteiligung von Verkehrsteilnehmern, die gerade nicht auf dieser Hauptstraße fahren. Auf die Straße einbiegende Fahrzeuge treffen in ihrer Grünphase, also genau zur Rotphase der Hauptstraße, auf diese und erfahren so durch die Grüne Welle eine maximale Verzögerung (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, o. J.-b). Fahrer, die sich nicht an die Richtgeschwindigkeit halten führen außerdem zu einem Auseinanderlaufen des Pulks, so dass bei einer begrenzten Grünphase Fahrzeuge zu früh oder zu spät an der nächsten Lichtsignalanlage ankommen und wieder auf Rotphasen treffen. Ist die Straße einspurig kann sich das fehlerhafte Verhalten einzelner Fahrer auf den gesamten Pulk auswirken. Dieser trifft dann zum Beispiel immer auf Rotphasen, was das "worst case" Szenario darstellt. In einer innerstädtischen Situation, die per se mit vielen Störfaktoren daherkommt kann das ganze Modell so nutzlos werden, wenn die statisch vorberechnete Schaltung ständig nicht mehr zur aktuellen Situation passt. So stellen die taiwanesischen

Physiker Ding-wei Huang und Wei-neng Huang fest: “Wenn der Verkehr eine bestimmte Dichte überschreitet, wird der Nutzen einer synchronisierten Ampelschaltung zur Illusion.” (in Tillemans, 2003).

Lösungsmöglichkeiten für nicht dynamische Schaltungen

Der beste Anwendungsbereich für eine komplette grüne Welle ergibt sich somit in relativ isolierten Straßen, deren Verbindungen zum restlichen Straßennetz in ausreichend Abstand stehen. Unregelmäßige Abstände im Widerspruch zu den obigen Formeln zur Koordinierung können durch Wechsel der Geschwindigkeit zwischen den Kreuzungen bedingt ausgeglichen werden, bei einer hohen angestrebten Reisegeschwindigkeit müssen die Abstände aber trotzdem groß bleiben. Ab einer gewissen Isolierung vom Netz kann es auch schon fast sinnvoll sein die Straße autobahnähnlich mit Zu- und Abfahrten zu verbinden.

Wenn die Abstände nicht ausreichend groß sind wird typischerweise die grüne Welle nur in einer Richtung geschaltet. Hier muss man im konkreten Fall jedoch sicherstellen, dass die Gegenrichtung dadurch nicht eine schlechtere Schaltung als vorher hat und somit künstlich benachteiligt wird. Durch Wartebereiche für Fußgänger zwischen den Fahrstreifen und eine veränderte Steuerung der Abbiegespuren gibt es auch Möglichkeiten beide Richtungen getrennt anzusteuern (Blaise & Kelly, 2011, S. 7), (Krimmling, 2017, S. 23-26).

Ein Auseinanderlaufen des Pulks kann man durch Geschwindigkeitssignale eindämmen, die während der Zeit von geringeren zu höheren Geschwindigkeiten steigen. Dadurch sehen zu schnelle Fahrzeuge, die das Signal zuerst erreichen eine geringere Geschwindigkeit und bremsen ab, während langsame Fahrzeuge, die das Signal später sehen beschleunigt werden sollen.

Zu erwähnen bleibt hier, dass sämtliche in diesem Abschnitt vorgestellte Konzepte und Lösungen ohne den Einsatz von Daten zur Laufzeit funktionieren und lediglich einem zuvor definierten Muster folgen.

5. VERKEHRSABHÄNGIGE LICHTSIGNALSTEUERUNG

Eine andere Möglichkeit der Verbesserung des Verkehrsflusses an Kreuzungspunkten mit Lichtsignalanlagen ist eine Steuerung unter Einbezug einzelner Datenquellen. Im Gegensatz zur klassischen Festzeitsteuerung (bei der die Steuerung zuvor einmal berechnet wurden und immer wieder durchläuft) und zur koordinierten Festzeitsteuerung (bei der Steuerungen mehrerer Lichtsignalanlagen zusammen geplant wurden) haben bei der verkehrsabhängigen Steuerung Sensoren Einfluss auf die Länge oder Reihenfolge der Signalbilder.

für den allgemeinen Kraftfahrzeugverkehr

Verändert sich die Menge der Fahrzeuge, die aus den verschiedenen Richtungen auf eine Kreuzung mit Lichtsignalanlage treffen, so bildet sich durch zu kurz gewählte Grünphasen ein Rückstau und die durchschnittliche Wartezeit der Verkehrsteilnehmer vergrößert sich stark. Eine verkehrsabhängige Steuerung kann auf unterschiedliche Zuflüsse mit unterschiedlichen Grünphasen reagieren. Der häufigste Fall der Steuerung besteht in einem festen Signalumlauf, bei dem je nach Bedarf einzelne Grünphasen verlängert werden können (Stralau, 2012). Nach Ablauf einer regulär geplanten, festen Grünphase für eine bestimmte Richtung erfolgt die bedingte Grünzeitverlängerung. Mithilfe einer Induktionsschleife in einigem Abstand vor der Ampel wird der zeitliche Abstand von aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gemessen. Ist dieser unter einem definierten Schwellenwert kann man davon ausgehen, dass es sich noch um denselben Fahrzeugpulk handelt und die Grünphase wird aufrecht erhalten. Überschreitet der Wert zwischen zwei Fahrzeugen den Schwellenwert (oder erreicht die verlängerte Phase einen definierten Endwert) endet die Grünphase und nur noch die gerade gemessenen Fahrzeuge können die Kreuzung noch überqueren (Krimmling, 2017, S. 28-29).

Neben Induktionsschleifen gibt es auch andere Sensoren, mithilfe von Kameras kann beispielsweise der Rückstau gemessen werden. In Systemen mit einer zentralen Vernetzung der einzelnen Anlagen können zusätzliche Informationen, wie ein gefährdender Rückstau auf eine Autobahn, zu lange Wartezeiten anderer Verkehrsteilnehmer durch mehrere Grünzeitverlängerungen in andere Richtungen, Rückstau hinter der Kreuzung oder einer Überlastung folgender Straßenabschnitte wie zum Beispiel einer Autobahnzufahrt ("ramp metering" (Federal Highway Administration, 2017)) weitere Verbesserungen liefern (Krimmling, 2017, S. 29-30), (Stralau, 2012).

für einzelne Verkehrsteilnehmer

Anstatt den gesamten Verkehr einer Richtung zu steuern kann es sinnvoll sein einzelne Fahrzeuge aufgrund ihrer Bedeutung zu priorisieren. Beispiele hierfür sind Einsatzfahrzeuge wie zum Beispiel Rettungswagen (WELT, 2017) oder Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs. Die besondere Behandlung kann über den Einfluss der Fahrtzeit auf Gefahren (bei Einsatzfahrzeugen) beziehungsweise auf die Menge der wartenden Personen gerechtfertigt werden. Durch die deutlich höhere Dichte von Personen in Bussen oder Bahnen im Vergleich zu Privatfahrzeugen warten in einem Bus häufig deutlich mehr Menschen als in einer Schlange von PKW.

Im Regelfall senden Busse oder Straßenbahnen per Funk ein oder mehrere Signale, bevor sie die Kreuzung erreichen. Gibt es keine anderen begrenzenden Faktoren wird die Phase, in der der Nahverkehr Fahrt angezeigt bekommt zur erwarteten Ankunftszeit gestartet. Um die Ankunftszeit möglichst genau zu kennen und somit die Einschränkungen für andere Richtungen zu minimieren kann es mehrere Anmeldungen geben, die die Lichtsignalanlage früh auf die Phasenänderung vorbereiten beziehungsweise später die Ankunftszeit präzisieren, wenn sich das Fahrzeug bereits näher an der Ampel befindet. Meldungen über Türschließung beziehungsweise Abfahrbereitschaft von der Haltestelle können ebenfalls Daten liefern. Eine Abmeldung nach Überqueren der Kreuzung führt zu einem schnellen

Ende von der abweichenden Schaltung (Krimmling, 2017, S. 9, S.30-31). Zu erwähnen bleibt hier noch, dass die Belastung der anderen Verkehrsteilnehmer in einer solchen Steuerung minimal ist, da zur Freigabe des ÖPNV üblicherweise auch der allgemeine Verkehr auf derselben Straße eine Grünphase erfährt.

6. MÖGLICHE VERBESSERUNGEN DURCH EINE UMFASSENDE DIGITALISIERUNG

Szenario einer perfekten Vernetzung

Als Grundlage der folgenden Diskussionen soll ein Modell dienen, in welchem die in den vorhergehenden Abschnitten technischen Lösungen als Annahmen gestellt werden. Wir gehen also von einer umfassenden Datenquelle in Form von direkt von den Fahrzeugen stammenden Positions-, Geschwindigkeits- und Zieldaten aus, die durch ein fehlerfreies Netzwerk übertragen werden und zentral zur Verfügung stehen. Außerdem können umgekehrt auch alle Informationen sowie Anweisungen zurück an alle Fahrzeuge im Straßenverkehr übertragen werden. Es soll nun analysiert werden, welche Verbesserungen sich durch diese perfekte Vernetzung umsetzen lassen.

frühzeitige Information über Ampelphasen in den Fahrzeugen

Eine Möglichkeit auch ohne perfekte grüne Welle den Treibstoffverbrauch zu verringern ist mithilfe von Informationen über aktuelle Ampelphasen mit einer angepassten Geschwindigkeit zu fahren und so weniger zu beschleunigen. Ein Beispiel für eine solche Lösung im privaten Kraftfahrzeugbereich bietet Audi mit dem Dienst Ampelinfo. Informationen von den Lichtsignalanlagen, Verkehrsrechnern und aus historischen Daten führen zu einer Schätzung der nächsten Grünphase. Entsprechend des Abstandes des Fahrzeugs zur Kreuzung wird dem Fahrer eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben, mit der er die nächste Ampel ohne Anhalten überfahren kann. Nachteil an diesem System ist die notwendige Schnittstelle des Systems zu den Lichtsignalanlagen einer Stadt, so dass das System erst in zwei deutschen Städten funktioniert (Günzel, 2020).

Ein anderes Beispiel aus dem Bereich ÖPNV findet sich bei den Dresdner Verkehrsbetrieben. Auf einem im Führerstand der Straßenbahnen angebrachten Smartphone werden in ähnlicher Weise Fahrempfehlungen gegeben, so dass unnötiges Beschleunigen und Bremsen verhindert wird und das Fahrzeug immer auf grüne Ampeln trifft. Eine mit den Lichtsignalanlagen verbundenen Zentrale liefert Daten an dieses Smartphone, welches eine sekundengenaue Abfahrt aus einer Haltestelle vorschlägt und im Fahrtverlauf Beschleunigung, eine feste Geschwindigkeit halten beziehungsweise Rollen empfiehlt. Da das Gerät nicht fest verbaut ist, nur Empfehlungen liefert und der Fahrer immer noch alle Entscheidungen trifft benötigt es keine teure Zulassung. Neben einem erhöhten Komfort durch weniger Bremsvorgänge verzeichnen die Dresdner Verkehrsbetriebe eine Verbesserung der Pünktlichkeit um 7%, eine Senkung des Fahrzeugverbrauchs um 21% sowie eine verkürzte Fahrzeit von bis zu 3min, je nach Linie (Hunscha, 2018).

Durch die genauere Positionsbestimmung und direktere Steuerung ergeben sich weitere Verbesserungen. So können die Freigabezeiten an Ampeln deutlich reduziert werden, weil man neben Ortsdaten nun auch planen kann, wie die Straßenbahn die Geschwindigkeit ändern wird und wann die Abfahrt erfolgen wird. Dadurch werden andere Verkehrsteilnehmer weniger belastet. Durch Entscheidungen des Systems über Anschlüsse können in manchen Fällen Signale länger in der Rotphase bleiben und so in mehr Fällen den Umstieg ermöglichen (Dresdner Verkehrsbetriebe AG, 2013).

Selbst-Steuerung

Wie im Abschnitt zur koordinierten Lichtsignalsteuerung gezeigt ist das optimale Modell der grünen Welle in den meisten komplexeren Situationen nicht umsetzbar. Für jede Situation muss eine eigene Lösung erarbeitet und implementiert werden, die häufig nicht optimal ist oder bestimmte Verkehrsströme unfair ausbremst. Der große Aufwand für eine solche

umfassende Planung führt dazu, dass viele Anlagen nicht an aktuelle, veränderte Bedingungen angepasst werden können.

Die Konzepte koordinierte und verkehrsabhängige Steuerung lassen sich in der Praxis nur schwer kombinieren, das eine hängt von einem genau geplanten, unveränderlichen Grundtakt ab, das andere soll flexibel auf Bedingungen reagieren können. Das heißt nicht, dass es keine Systeme geben kann, die beide Strategien verwenden: Eine koordinierte Steuerung, bei der jede Lichtsignalanlage eine feste Phasenfolge und Umlaufzeit hat und lediglich einzelne Grünphasen gegenüber anderen verlängert ist möglich. Die Flexibilität dieser Anlage ist allerdings trotzdem noch sehr begrenzt und erfordert einen noch höheren Planungsaufwand.

Eine Mögliche Lösung dieser Probleme ist eine Lichtsignalsteuerung, die sich komplett von festen Planungen löst und ohne feste Signalpläne oder Umlaufzeiten auskommt, die also ausgehend von der aktuell gemessenen Situation die dringlichste Richtung freigibt. Mithilfe von Sensoren wird erfasst, wieviele Fahrzeuge aus jeder Richtung ankommen und wieviele Fahrzeuge aktuell warten. Neben Verkehrskameras ist eine genutzte Möglichkeit der Verwendung von Zufahrtsschleifen weit vor der Kreuzung und Abfahrtsschleifen direkt hinter der Haltelinie. So kann mit Hilfe von Zählungen erkannt werden, wie lange die Schlange ist (Lämmer, Krimmling & Hoppe, 2009, S. 4). Jedem Zufluss, hierbei wird aus jeder Richtung noch der Zustrom der Fahrzeuge einzelner Spuren, Fahrräder und Fußgänger einzeln betrachtet, wird ein Prioritätsindex zugeordnet (Lämmer, 2007, S. 68). Dieser berechnet sich aus der Summe der notwendigen Wartezeiten (Wartezeitgewicht) aller betroffenen Fahrzeuge zusammen mit einem Stoppgewicht, dass zu jedem Fahrzeug noch addiert wird, falls es durch die Schaltung anhalten muss. Über einen Optimierungsalgorithmus wird ständig berechnet welche Kombination von kompatiblen Verkehrsströmen in der nächsten Phase das Gewicht möglichst stark verringert.

Plant man eine neue Kreuzung mit diesem System muss man anstatt jede Phase jeden Verkehrsstroms zu definieren lediglich einige Parameter der neuen Kreuzung definieren. Dies sind vor allem Vorgaben zu minimalen Grünphasen oder Schutzzeiten, in denen der Verkehr

aus der Kreuzung abfließen kann. Damit wird trotz der flexiblen Steuerung eine Kompatibilität mit der Straßenverkehrsordnung gewährleistet. Zusätzlich kann über eine Konfiguration der Gewichte zu jedem Zeitpunkt sehr einfach Einfluss auf die Priorisierung der verschiedenen Verkehrsteilnehmer genommen werden. Ein Beispiel wäre folgende Konfiguration:

Verkehrsart	Wartezeitgewicht	Stoppgewicht
Pkw und Lkw	1 s	5 s/Stop
Bus	15 s	30 s/Stop
Straßenbahn	50 s	30 s/Stop
Fußgänger (Fahrbahnrand)	1 s	0 s/Stop
Fußgänger (Mittelinsel)	5 s	20 s/Stop
Radfahrer	1 s	10 s/Stop

(Lämmer, o. J., S. 6). Busse und Straßenbahnen werden hier gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern stärker gewichtet, was die Chance auf eine frühe Grünschalung erhöht, aber eben nicht gewährleistet. So blockiert ein einzelner Bus nicht das Vorankommen eines großen Pulks von PKW auf der Hauptstraße. Fußgänger auf der Mittelinsel haben ja bereits gewartet und werden deshalb beim zweiten Mal deutlich bevorzugt. Spezielle Einflüsse können ebenfalls berücksichtigt werden, man kann zum Beispiel maximale Wartezeiten definieren oder Anschlüsse an den ÖPNV durch Behinderung der abfahrenden Fahrzeuge gegenüber zufahrenden Fahrzeugen oder Fußgänger gewährleisten (Lämmer, o. J., S. 6).

Dieses System sollte mit einem guten Optimierungsalgorithmus zu jeder Zeit die effizienteste Lösung für diese Lichtsignalanlage finden, benötigt dabei keine unterschiedlichen Schaltungen für verschiedene Tageszeiten und spart viel Planungsaufwand. Da ein herannahender Pulk aus Fahrzeugen eine hohe Priorität hat ist es häufig sinnvoll diesen direkt weiter fahren zu lassen und bei mehreren Lichtsignalanlagen somit spontan eine grüne Welle entstehen zu lassen, ohne dass Informationen ausgetauscht werden müssen. Dabei werden trotzdem weiterhin alle anderen Verkehrsströme nicht benachteiligt. Eine grüne Welle ist so auf einer Straße in beide Richtungen möglich, zusätzliche können auch

andere Verkehrsteilnehmer wie zum Beispiel Fußgänger in einer großen Gruppe Vorrang erhalten.

Ein Praxistest an zwei aufeinanderfolgenden, komplexen Lichtsignalanlagen in Dresden zeigt eine Senkung der mittleren Wartezeit durch die Einführung des Systems von 37,8% für Fußgänger, 33,6% für Radfahrer, 38,4% für den motorisierten Individualverkehr und ganze 80,4% für den öffentlichen Personennahverkehr (Lämmer, o. J., S. 10).

koordinierte Selbst-Steuerung

Fügt man diesem Prinzip eine Möglichkeit der Kommunikation der einzelnen Anlagen untereinander hinzu kann man mit diesem Modell auf eine weitere Situation reagieren: Staut sich der Verkehr durch eine Störung auf einer Straße zurück kann in einem normalen Straßennetz dieser Stau so lang werden, dass folgende Kreuzungen blockiert werden und der Verkehr in andere Richtungen ebenfalls behindert wird. Wird einer Rückstau hinter einer selbstgesteuerten Lichtsignalanlage durch die Vernetzung erkannt können alle in diese Richtung abfahrenden Spuren gesperrt werden, indem sie dauerhaft eine Rotphase angezeigt bekommen. Dadurch wird es Fahrzeugen ermöglicht auf anderen Routen die Störstelle zu umfahren und gleichzeitig die Nutzbarkeit des restlichen Netzes zu erhalten (Lämmer, Treiber & Rausch, o. J.). Im Gegensatz zu anderen Meldesystemen sind Lichtsignalanlagen verbindlich und es wird keine Zeit verschwendet, die ein Warten auf menschliches Eingreifen verursachen würde. Durch freiere Straßen haben so Einsatzfahrzeuge einen schnelleren Weg zu Unfallstellen als Ursachen von Rückstau.

Benötigte Infrastruktur

“Die Qualität einer auf Verkehrsdaten optimierenden Steuerung korreliert mit der Qualität der Datenerfassung” (Lämmer, o. J., S. 11). Die Technologie funktioniert bereits mit zwei Sensorschleifen pro Fahrbahn für den allgemeinen motorisierten Verkehr. Über andere

Verkehrsteilnehmer, wie Radfahrer oder Fußgänger, reicht es im einfachsten Fall Annahmen über deren Menge zu treffen. Aber die Ergebnisse des Algorithmus werden natürlich optimaler, wenn die Kenntnis über die aktuelle Situation größer ist. Dies lässt sich zum Beispiel für Taster für Fußgänger, Verkehrskameras mit Personen-, Fahrrad- und Kraftfahrzeugerkennung sowie Informationen über entferntere Situationen über weitere Sensoren oder die gesammelten Informationen benachbarter Signalanlagen (Lämmer, o. J., S. 11). Wirklich großflächig erhobene Daten helfen dem System aber nicht weiter, der Vorhersagehorizont beträgt nach Lämmer 5 bis 15s, weit entfernte Fahrzeuge nehmen erst in der Nähe der Kreuzung selbst Einfluss auf die Steuerung.

7. BEWERTUNG DER SYSTEME

Die in den vorhergehenden Abschnitten erarbeiteten optimalen Lösungen sollen nun als Basis für die Bewertung eines umfassend digitalisierten Verkehrsleitsystems dienen. Es geht hier also um eine dezentrale, eigenständige Steuerung der Lichtsignalanlagen, eine umfassende Datenquelle sowie eine Möglichkeit der Empfehlung von Geschwindigkeiten auf Anzeigen innerhalb der Fahrzeuge.

Vorteile im Vergleich zur aktuellen Steuerungstechnik

Der wichtigste Vorteil eines solchen Systems ist eine deutliche Erhöhung der Reisegeschwindigkeit teilweise um 35,2% (Blaise & Kelly, 2011, S. 7). Da die Kapazität des Straßennetzes innerhalb von Ballungsräumen in erster Linie durch die Wartezeiten an Kreuzungen begrenzt ist steigert ein solcher Ansatz die Kapazität des bestehenden Netzes ebenfalls deutlich. Dabei werden deutlich weniger Kosten verursacht als eine Straßenverbreiterung oder räumliche Trennung der Verkehrsströme benötigen würden.

Ein solches System wäre durch eine Rückstauerkennung in der Lage gegenüber Störungen deutlich weniger anfällig zu sein und so die Zuverlässigkeit des Straßennetzes zu erhöhen. Durch die Rückstauerkennung und Priorisierung von Einsatzfahrzeugen werden deren Fahrten beschleunigt und es können mehr Leben gerettet werden.

Die Nachhaltigkeit des Straßenverkehrs kann erhöht werden, da durch geringere Wartezeiten und frühzeitige Anpassung der Geschwindigkeit durch die Fahrempfehlungen im Auto der Verbrauch und die Abnutzung der Fahrzeuge sinkt und der Schadstoffausstoß verringert wird (Blaise & Kelly, 2011, S. 1-2, S. 7)(Hunscha, 2018, S. 18). Der Komfort im ÖPNV wird durch frühe Informationen und seltenere komplette Halte gesteigert (Hunscha, 2018, S. 18) und es können in Einzelfällen Kosten gespart werden, wenn die Fahrzeit genug sinkt um ein Fahrzeug und Fahrer auf einer Linie einzusparen (Hunscha, 2018, S. 18). Die

Priorisierung des Nahverkehrs kann an allen Lichtsignalanlagen fair und konsequent erfolgen und bestimmte Anschlüsse können besser erreicht werden, was Komfort und Reisezeit der Kunden verbessert (Lämmer, o. J., S. 6-7).

Die Verkehrsplanung wird vereinfacht, was weitere Kosten spart (Lämmer, 2019b) und durch die dynamische Schaltung erfährt man Vorteile auch bei der Umrüstung von nur einzelnen Anlagen. Verkehrsplaner können zu jedem Zeitpunkt und ohne Neuplanung von Signalfolgen die Priorität verschiedener Verkehrsteilnehmer anpassen.

Insgesamt kann man so mit vergleichsweise wenigen Kosten die Qualität von Straßennetzen in Ballungsgebieten enorm verbessern.

Probleme

Die Einführung solcher Systeme ist natürlich trotzdem mit Kosten und Installationsaufwand verbunden. Es gibt sicherlich viele Kreuzungspunkte, deren geringe Auslastung sicherlich nicht rechtfertigen. Ein weiterer Nachteil könnte sich aus der ungewohnten neuen Situation für Verkehrsteilnehmer ergeben. Man kann bei bekannten Lichtsignalanlagen nicht mehr anhand anderer Phasen die eigene Grünphase erwarten, da die Reihenfolge der Phasen nicht jedes Mal gleich ist. Irritationen könnten entstehen, falls eine Richtung mehr als einmal hintereinander eine grüne Phase erhält.

Weitere Nachteile sind nicht zu erwarten, falls aus unerwarteten Gründen eine einzelne Lichtsignalanlage nach der Umstellung schlechtere Ergebnisse als zuvor liefert, ist eine Rückkehr zum alten Umlauf einfach und hat keine großen negativen Folgen auf andere Anlagen.

Vergleich der Bedeutung zum autonomen Fahren

Für eine faire Gegenüberstellung soll auch für automatisierte Fahrzeuge ein technisch optimaler Zustand, also das autonome Fahren nach Stufe 5 der SAE-Klassifizierung,

angenommen werden (SAE International, 2014). Es muss jedoch erwähnt werden, dass ein Fahrzeug mit automatisierten Fahrens dieser Stufe jedoch viel mehr Hürden überwinden muss, als eine nach (Lämmer, o. J.) konstruierte selbst-gesteuerte Lichtsignalanlage. (Spröte, 2020, S. 23-24) folgend gibt es neben hohen technischen und rechtlichen Hürden auch noch einige gesellschaftliche Probleme zu überwinden, wie eine entstehende Arbeitslosigkeitsschleife und eine zu erarbeitende Akzeptanz in der Bevölkerung. Auf der anderen Seite werden selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen bereits ohne viel Aufsehen in der Praxis eingesetzt. Es reicht die Installation einiger, bereits lange gebräuchlicher, Sensoren und eines neuen steuernden Algorithmus.

Zu den wichtigsten Vorteilen autonomer Fahrzeuge zählen eine erhöhte Sicherheit, Zugänglichkeit und ein verbesserter Komfort, da andere Aktivitäten während der Fahrt möglich werden. Weiterhin kann die Zahl der Fahrzeuge verringert werden, wenn mehrere Personen dasselbe Fahrzeug verwenden (Spröte, 2020, S. 21-22). Andererseits können Zugänglichkeit und Komfort der Fahrzeuge sowie eine geringere Fahrzeugzahl auch genauso schon heute durch eine Kombination von carsharing und Taxidiensten, wenn auch zu einem höheren Preis, gewährleistet werden. Die starken Verbesserungen im Verkehrsfluss und damit der Fahrzeit durch die Installation von selbst-gesteuerten Lichtsignalanlagen kann so gut als die einflussreichere Technologie betrachtet werden.

Fazit

Angesichts vielversprechenden theoretischen und in einzelnen Praxisstudien nachgewiesenen stark verkürzten Reisezeiten und verringerten Verbräuche zeigen sich die großen Potentiale der oben beschriebenen Technologien. Zusammen mit den vergleichsweise geringen Installationskosten und praktisch keinen Risiken kann ich der entwickelten These komplett zustimmen. Gerade im Vergleich zum autonomen Fahren, dass eine große Aufmerksamkeit erhält halte ich die Bedeutung von guter Verkehrssteuerung für deutlich unterschätzt.

QUELLENVERZEICHNIS

2wcom. (2006). RDS Basics. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://www.2wcom.com/fileadmin/redaktion/dokumente/Company/RDS_Basics.pdf

AVANTEQ GmbH. (2010). TMC - Traffic Message Channel. Abgerufen 17. Mai 2020, von <http://www.avanteq.de/eng/what-is-tmc.html>

Barth, D. (2009). The bright side of sitting in traffic: Crowdsourcing road congestion data. Abgerufen 16. Mai 2020, von <https://googleblog.blogspot.com/2009/08/bright-side-of-sitting-in-traffic.html>

Blaise, & Kelly. (2011). A „Green Wave“ Reprieve. Abgerufen 14. Mai 2020, von <http://www.jctconsultancy.co.uk/Symposium/Symposium2011/PapersForDownload/A%20Green%20Wave%20Reprieve%20Blaise%20Kelly.pdf>

Bohlinger, M. (2007). Koordinierte Lichtsignalsteuerung. Abgerufen 14. Mai 2020, von <http://www.optiv.de/Fallbsp/08-Isa/08-Isa/index.htm?13>

Boltze, M., & Reusswig, A. (2005). Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen. Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation. Abgerufen 17. Mai 2020, von <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1676/file/V128.pdf>

Brindle, B. (2020). How Does Google Maps Predict Traffic? Abgerufen 16. Mai 2020, von <https://electronics.howstuffworks.com/how-does-google-maps-predict-traffic.htm>

Deutschlandfunk. (2017). Projekt Veronika: Kassel will grüne Welle für Busse und Rettungswagen. Abgerufen 9. Dezember 2019, von https://www.deutschlandfunk.de/projekt-veronika-kassel-will-gruene-welle-fuer-busse-und.1939.de.html?drn:news_id=1077441

Dresdner Verkehrsbetriebe AG. (2013). Eingebaute Grüne Welle. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.dvb.de/~ /media/files/die-dvb/dvb-broschuere-neue-ampelschaltung.pdf>

Ebers, S. (o. J.). Handyortung durch GSM - diese Technik steckt dahinter. Abgerufen 16. Mai 2020, von <https://gps-ortung.net/handyortung/gsm/>

Federal Highway Administration. (2017). Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy - A Primer. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14020/sec1.htm>

Günnel, T. (2020). Grüne Welle: Ampelassistent in zweiter deutscher Stadt verfügbar. Abgerufen 17. Mai 2020, von <https://www.automobil-industrie.vogel.de/gruene-welle-ampelassistent-in-zweiter-deutscher-stadt-verfuegbar-a-830381/>

Hofmann, U. (2017). Dresdner Ampelsystem bringen DVB Zeit- und Geldersparnis. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.dnn.de/Dresden/Lokales/Dresdner-Ampelsystem-bringen-DVB-Zeit-und-Geldersparnis>

Hoppe, A. (2009). Die ÖPNV-Beschleunigung. Abgerufen 16. Mai 2020, von https://gliederungen.vcd.org/uploads/media/Hoppe_DVB_02.pdf

Hunscha, U. (2018). Fahr umweltbewusst! Zum Einsatz von Fahrerassistenzsystemen im deutschen Schienenpersonennahverkehr. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://www.deutschernahverkehrstag.de/fileadmin/documents/presentationen/2018/DNT2018_Praesentation_Hunscha.pdf

Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., & Winton, R. I. (o. J.). SCOOT - a traffic responsive method of coordinating signals. Abgerufen 18. Mai 2020, von <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR1014.pdf>

Julke, R. (2019). AfD will eine Grüne Welle, um möglichst schnell aus Leipzig rauszukommen. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.l-iz.de/politik/brennpunkt/2019/10/AfD-will-eine-Gruene-Welle-um-moeglichst-schnell-aus-Leipzig-rauszukommen-301764>

Krimmling, J. (2017). Ampelsteuerung: Warum die grüne Welle nicht immer funktioniert. Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17321-0>

Lämmer, S. (o. J.). Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest. Abgerufen 18. Mai 2020, von <http://stefanlaemmer.de/de/Selbst-Steuerung/Laemmer2016.pdf>

Lämmer, S. (2007). Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken. Abgerufen 18. Mai 2020, von <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A23982/attachment/ATT-0/>

Lämmer, S. (2019a). Selbst-Heilung. Ampeln verhindern Verkehrsinfarkt. Abgerufen 18. Mai 2020, von <http://stefanlaemmer.de/de/?content=Selbst-Heilung>

Lämmer, S. (2019b). Selbst-Steuerung. Ein neues Leitbild der Ampelsteuerung. Abgerufen 18. Mai 2020, von <http://stefanlaemmer.de/de/>

Lämmer, S., Krimmling, J., & Hoppe, A. (2009). Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen – Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. Abgerufen 18. Mai 2020, von <http://stefanlaemmer.de/de/Selbst-Steuerung/Laemmer2009.pdf>

Lämmer, S., Treibe, M., & Rausch, M. (o. J.). Inflow-Regulating Traffic Light Control to Avoid Queue-Spillovers in Urban Road Networks. Abgerufen 18. Mai 2020, von <http://stefanlaemmer.de/de/Selbst-Heilung/Laemmer2013.pdf>

Miltner, T. (2019). VERONIKA - Vernetztes Fahren des ÖPNV. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://www.kassel.de/buerger/verkehr_und_mobilitaet/verkehrsprojekte/veronika.php

Palmer, B. (2014). How mapping software gathers and uses traffic information. The key element is you. Abgerufen 16. Mai 2020, von https://www.washingtonpost.com/gdpr-consent/?next_url=https%3a%2f%2fwww.washingtonpost.com%2fnational%2fhealth-science%2fhow-mapping-software-gathers-and-uses-traffic-information-the-key-element-is-you%2f2014%2f02%2f14%2f693606d4-9263-11e3-b46a-5a3d0d2130da_story.html

Rausch, M. (2015). Ereignisorientierte Routenwahl in spontan gestörten Stadtstraßennetzen zur Anwendung eines selbstorganisierten Störfallmanagements. Abgerufen 18. Mai 2020, von <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A29232/attachment/ATT-1/>

SAE International. (2014). J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On- Road Motor Vehicle Automated Driving Systems - SAE International. Abgerufen 18. Mai 2020, von https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin. (o. J.-a). Ampeln und Co. Fachbegriffe/FAQ. Abgerufen 17. Mai 2020, von [https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/lenkung/ampeln/lenkung/ampeln/fachbegriffe/index.shtml](https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/lenkung/ampeln/fachbegriffe/index.shtml)

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin. (o. J.-b). Grüne Welle. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/lenkung/ampeln/sicherheit/de/gruene_welle.shtml

Shiguang, J. (2012). Beitrag zum Ermitteln von Prioritätsstufen zur fahrtkonkreten Beeinflussung von Lichtsignalanlagen und zur Anschlusssicherung im ÖPNV. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A26235/attachment/ATT-1/>

Spröte, E. (2020). Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren - Potenziale und Grenzen. Abgerufen 16. Mai 2020, von <http://www.informatik.uni-leipzig.de/~graebe/Texte/Sproete-20.pdf>

Stadt Freiburg. (2018). So steuern Ampeln den Verkehr. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.freiburg.de/pb/561745.html>

Statista. (2018). Stressoren rund ums Autofahren in Deutschland 2018. Abgerufen 18. Mai 2020, von <https://de.statista.com/prognosen/856943/umfrage-in-deutschland-zu-stressoren-rund-ums-autofahren>

Stralau, M. (2012). So werden die Ampeln der Stadt geschaltet. Abgerufen 17. Mai 2020, von <https://www.moz.de/landkreise/oder-spree/frankfurt-oder/artikel9/dg/0/1/1017298/>

Tillemans, A. (2003). Grüne Welle funktioniert nur bei geringer Verkehrsdichte. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.wissenschaft.de/technik-digitales/gruene-welle-funktioniert-nur-bei-geringer-verkehrsdichte/>

T-Online. (2011). HD Traffic und Navteq Traffic: Echtzeit-Stauwarner im Überblick. Abgerufen 16. Mai 2020, von https://www.t-online.de/digital/navigation/id_48338602/hd-traffic-und-navteq-traffic-echtzeit-stauwarner-im-ueberblick.html

WELT. (2017). Grüne Welle für Rettungswagen in Aurich bewährt sich. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://www.welt.de/regionales/niedersachsen/article166279460/Gruene-Welle-fuer-Rettungswagen-in-Aurich-bewaehrt-sich.html>

Wikipedia contributors. (2020). Ramp meter. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://en.wikipedia.org/wiki/Ramp_meter

Wikipedia-Autoren. (2003a). Grüne Welle. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://de.m.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BCne_Welle

Wikipedia-Autoren. (2003b). Radio Data System. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://de.wikipedia.org/wiki/Radio_Data_System

Wikipedia-Autoren. (2004a). Pilotton-Multiplexverfahren. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Pilotton-Multiplexverfahren>

Wikipedia-Autoren. (2004b). Traffic Message Channel. Abgerufen 14. Mai 2020, von https://de.wikipedia.org/wiki/Traffic_Message_Channel

Wikipedia-Autoren. (2005). UKW-Rundfunk. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://de.wikipedia.org/wiki/UKW-Rundfunk>

Wikipedia-Autoren. (2011). Verkehrslagedienst. Abgerufen 14. Mai 2020, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrslagedienst>

Wright, S. (1998). RBDS versus RDS - What are the differences and how can receivers cope with both systems? Abgerufen 14. Mai 2020, von <http://catcatcat.d-lan.dp.ua/wp-content/uploads/2013/05/rbdsrds.pdf>
