

Stabilitätsprobleme vollverkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerungen

Kurzfassung

Von Lichtsignalsteuerungen, die vorrangig auf das lokale Verkehrsgeschehen vor Ort reagieren, sind einerseits positive verkehrliche Wirkungen zu erwarten. Eine ausgewogene ÖV-Beschleunigung gehören ebenso dazu wie eine flexible Kolonnenführung in Form dynamischer Grüner Wellen. Andererseits sind mit solchen Steuerungen besondere regelungstechnische Schwierigkeiten verbunden: Sie können sich im Netz dynamisch aufschaukeln oder aus anderen Gründen die Kapazität der Knotenpunkte herabsetzen. Dann werden Rückstaus von Mal zu Mal länger, obwohl eine Festzeitsteuerung in derselben Situation noch nicht ausgelastet wäre. Derartige Stabilitätsprobleme werden anhand einfacher Rechenbeispiele für drei unterschiedliche vollverkehrsabhängige Steuerungsansätze analytisch dargelegt und diskutiert.

Im zweiten Teil der Studie wird ein lokaler Stabilisierungsmechanismus vorgestellt. Er überwacht die vollverkehrsabhängige Steuerung und greift notfalls ein, sodass jeder Verkehrsstrom ausreichend häufig und bei Bedarf ausreichend lange grün bekommt. Es lassen sich mittlere und maximale Bedienfolgezeiten vorgeben. Bei Übersättigung werden automatisch die Grünzeiten eines wählbaren Festzeitprogramms angewendet. So können verkehrs- und sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllt sowie stadtplanerische Zielstellungen umgesetzt werden. Das Stabilisierungskonzept zielt nicht direkt auf die Minimierung von Wartezeiten, sondern auf die Zuweisung benötigter Abfertigungskapazitäten. Es kann mit beliebigen und ansonsten instabilen Steuerungsverfahren kombiniert werden.

Verfasser

Dr.-Ing. Stefan Lämmer

Professur für Verkehrsökonomie und -statistik
Institut für Wirtschaft und Verkehr
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Technische Universität Dresden

<http://www.stefanlaemmer.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Stabilität	5
1.3	Aufbau und Ziel der Studie	6
2	Lokale Optimierung	8
2.1	Szenario	8
2.2	Prognosebasierte Optimierung	9
2.3	Dynamische Priorisierung	13
2.4	Logiksteuerung	14
3	Wechselwirkungen im Netz	20
3.1	Szenario	20
3.2	Dynamisches Aufschaukeln	21
3.3	Stabilitätsverlust	23
3.4	Verallgemeinerung	24
4	Stabilisierung	27
4.1	Ansatz	27
4.2	Zustandsüberwachung	29
4.3	Spezifikation	31
4.4	Freiheitsgrade	34
4.5	Ergebnisse	36
5	Zusammenfassung	42
5.1	Anwendungsfälle	42
5.2	Fazit	43
	Literatur	44

1 Einleitung

1.1 Motivation

Anfang der 90er Jahre sorgten Kumar u. Seidman (1990) für Aufsehen. Sie untersuchten Strategien zur automatisierten Steuerung von Produktions- und Materialfluss-Netzwerken. Dabei entdeckten sie, dass manche davon dynamische Instabilitäten hervorrufen. Am wenigsten hatte man es wohl von der Strategie erwartet, die lautet: Arbeite an jeder Bedienstation erst die Aufträge eines Typs vollständig ab und rüste, nachdem der Eingangspuffer geleert ist, zu den Aufträgen eines anderen Typs um. Denn diese Strategie liefert – solange es nur eine einzige Bedienstation gibt – den maximalen Durchsatz. Doch im Netz, wenn die abgearbeiteten Aufträge zu anderen Station weitergeleitet werden, kann sich das System dynamisch aufschaukeln: Bei einigen Stationen laufen lange Zeit überhaupt keine Aufträge ein, und dann auf einmal so viele, dass sie mit der Bearbeitung nicht mehr nachkommen. Kumar, Seidman und die von Bramson (2008) aufgeführten Wissenschaftler haben erkannt, dass es Steuerungen gibt, die allen Stationen im Netz den maximalen Durchsatz verleihen, und solche, mit denen das Netz schon vorher zusammenbricht. Für Lichtsignalsteuerungen und vernetzte Verkehrsströme gilt das Gleiche.

Einordnung

Die klassische Festzeitsteuerung gehört in die erste Kategorie. Denn mit ihr bekommen alle an einem Verkehrsknoten zufließenden Ströme reihum, einmal je Umlauf, hinreichend lange Grün. Durch Wahl der Umlaufzeit und der Grünzeiten lässt sich die Kapazität der Knotenpunkte unmittelbar vorgeben. Grundlage für deren Bemessung sind die von Webster (1958); Little (1966); Gartner u. a. (1975) herausgestellten Gesetzmäßigkeiten und die Formeln in den einschlägigen Richtlinien RiL (1992); HBS (2005).

Ebenso auf der sicheren Seite sind teil-verkehrsabhängige Steuerungen, die zwar ein gewisses Maß an Verkehrsabhängigkeit aufweisen, doch im Wesentlichen auf Festzeitprogrammen beruhen oder von solchen gestützt werden. Dazu gehören beispielweise SCOOT und TUC, die von einem Festzeitprogramm ausgehen und dessen Parameter modellbasiert den Verkehrsschwankungen nachführen (vgl. Hunt u. a. (1981) bzw. Papageorgiou u. a. (2003)). Des Weiteren gehören adaptive Netzsteuerungen dazu. Bei diesen analysiert ein Zentralrechner die netzweite Verkehrslage und leitet daraus strategische Rahmensignallpläne ab, die von den verteilten Knotensteuerungen vor Ort flexibel ausgestaltet werden. Nach Steierwald u. a. (2005) sehen diese Rahmen in der Regel Zeitfenster vor, in denen bei Bedarf Grünzeiten verlängert oder Fußgänger- und ÖV-Ströme eingeschoben werden können. Auch wenn moderne Steuerungen¹ die Rahmen fortlaufend reoptimieren, haben

¹Hierzu zählen unter anderen Motion (vgl. Busch u. Kruse (1993)), Balance (vgl. Friedrich (2000)) und

sie die hier behandelten Probleme nicht – zumindest solange der restriktive Teil jedes Rahmens für sich den Anforderungen eines ordentlichen bemessenen Festzeitprogramms genügt.

Problematischer ist dagegen eine Steuerung, die für Straßenbahnen nicht nur ein oder zwei Zeitfenster je Umlauf vorsieht, sondern in Abwägung mit anderen Verkehrsströmen umschaltet, sobald eine die Kreuzung erreicht. Für eine ausgewogene, wirkungsvolle ÖV-Beschleunigung und für eine bedarfsgerechte, dynamische Kolonnenführung sind Steuerungen erforderlich, die flexibel auf das Verkehrsgeschehen vor Ort reagieren können. Dabei ist es unerheblich, ob solche Steuerungen dezentral implementiert sind, ob sie mit anderen Steuerungen kommunizieren, oder ob ihre Algorithmen auf einem Zentralrechner laufen. Eine vollverkehrsabhängige Steuerung zeichnet sich stattdessen dadurch aus, dass sie die Schaltprogramme aus den tatsächlichen Gegebenheiten heraus im laufenden Betrieb selbst bildet. Mit solchen Steuerungen sind deutliche Verbesserungen im Verkehrsablauf zu erwarten, wie zahlreiche Feld- und Simulationsstudien belegen. Von diesen berichten beispielsweise Boillot u. a. (2000); Gartner u. a. (2001); Mirchandani u. Wang (2005); Kobbeloer (2007); Prothmann u. a. (2009); Lämmer u. a. (2009). Doch die besondere Schwierigkeit beim Entwurf und beim Einsatz vollverkehrsabhängiger Steuerungen ist, dass diese unter allen Umständen die sicherheits- und verkehrsrelevanten Anforderungen erfüllen müssen – bei Detektorausfällen ebenso wie unter starken Verkehrslasten.

Preis der Verkehrsabhängigkeit

Je mehr Freiheiten lokale Steuerungen zur Optimierung des Verkehrsablaufs erhalten, desto mehr entziehen sie sich planerischen und strategischen Vorgaben. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen zieht ihr Einsatz zwangsläufig die in der Fachwelt viel diskutierten Probleme nach sich. „*Dschungelprinzip*“ nennt es Friedrich (2007), wenn in einem Straßennetz mit flexibel gesteuerten Kreuzungen „*die Wechselwirkungen benachbarter Anlagen [...] kaum abschätzbar*“ ist. Indem jede Anlage auf den bei ihr ankommenden Verkehr reagiert, reagiert sie auf das, was ihr die benachbarten Anlagen kurze Zeit vorher gesendet haben. Auf diese Weise transportieren die vernetzten Verkehrsströme Informationen von einer Kreuzung zur nächsten. Jede Anlage ist mit jeder anderen im Netz dynamisch gekoppelt. Daraus erwachsen Probleme, für die es bislang noch keine zufriedenstellenden Lösungsansätze gibt. So stellen Papageorgiou u. a. (2003) fest: „*The properties of a completely decentralized operation (e.g., independent algorithm application at each intersection) are currently not fully analyzed or understood.*“

Es bedarf der Entwicklung wirkungsvoller Methoden, die unabhängig vom eingesetzten Optimierungsverfahren sicherstellen, dass alle Verkehrsströme an jedem verkehrsabhängig

Travolution (vgl. Braun u. a. (2009)).

gesteuerten Knoten im Netz hinreichend oft und zum Aufrechterhalten der netzweiten Flussbeziehungen hinreichend lange Grün bekommen. Anderenfalls können mit solchen Steuerungen Stabilitätsprobleme auftreten.

1.2 Stabilität

Stabilitätsprobleme

Ein Stabilitätsproblem liegt vor, wenn eine Knotensteuerung nicht mehr nachkommt, den zufließenden Verkehr abzufertigen. Dafür kann es unterschiedliche Gründe geben, zu häufiges Umschalten beispielsweise. Aber selbst wenn Zwischenzeiten nicht die entscheidende Rolle spielen, kann instabiles Verhalten auftreten. So können hoch priorisierte Hauptströme zu lange Grünzeiten einfordern und die Abfertigung der Nebenstraßen unter ein kritisches Maß abdrängen. Zudem ist in einem vollverkehrsabhängig gesteuerten Netz kaum mehr abzuschätzen, wie sich ein lokaler Eingriff zu einem späteren Zeitpunkt oder an einer anderen Stelle auswirken wird. Optimierungsverfahren, die auf Prognosen beruhen, können Fehlentscheidungen treffen, die im Nachhinein schwierig oder im Wiederholungsfall gar nicht mehr auszugleichen sind. Ein anderes Beispiel geben Kumar u. Seidman (1990): Benachbarte Knotenpunkte können sich dynamisch aufschaukeln, so dass die Verkehrslast das eine Mal extrem hoch und kurze Zeit später extrem niedrig ist. All das setzt die Kapazität der Knotenpunkte systematisch herab und kann dazu führen, dass die Warteschlangen, wie die aus Abbildung 1, von Mal zu Mal länger werden.

Stabilitätsbegriff

Gemäß der Definition von Perkins u. Kumar (1989) ist ein Warteschlangennetz stabil, wenn sämtliche Warteschlangen für alle Zeiten beschränkt bleiben. Anderenfalls, wenn also mindestens eine Warteschlange immer weiter anwächst, ist es instabil. Um für die Stabilitätsprüfung überhaupt den Grenzwert $t \rightarrow \infty$ bilden zu können, muss man von stationären Bedingungen ausgehen, also von einer Verkehrsnachfrage mit gleichbleibenden statistischen Eigenschaften. Selbstverständlich unterliegt die Verkehrsnachfrage ausgeprägten Schwankungen und irgendwann löst sich jeder Rückstau auch wieder auf, spätestens nachts oder wenn der Verkehr auf andere Routen ausweicht. Doch am theoretischen Grenzwert lässt sich die Tendenz ablesen, ob Rückstaus immer weiter anwachsen oder ob es der Steuerung gelingt, diese nach und nach aufzulösen.

Maßstab Festzeitsteuerung

Stabiles Verhalten verlangt, dass eine Knotensteuerung der vorliegenden Verkehrsnachfrage ein entsprechendes Angebot an Grünzeiten gegenüberstellt. Dem sind natürliche

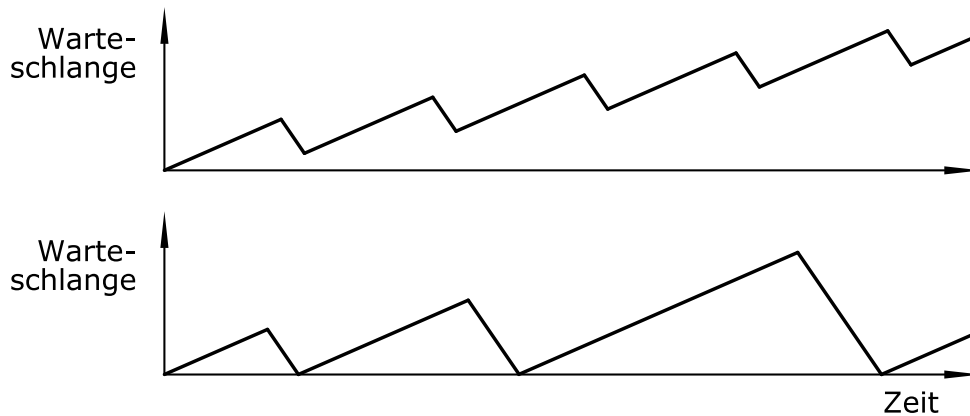


Abbildung 1: Beispiele instabiler Warteschlangen.

Grenzen gesetzt: Ab einer zu großen Nachfrage ist jede Steuerung instabil. Als Maßstab dafür, welche Verkehrsmenge von einer stabilen vollverkehrsabhängigen Steuerung zu bewältigen sein muss, soll die Durchlassfähigkeit einer angepassten Festzeitsteuerung dienen. Erst wenn eine Steuerung in all den Situationen stabiles Verhalten zeigt, für die sich ein stabiles Festzeitprogramm finden lässt, wird sie stabil genannt. In diesem Sinne können auch mit einer stabilen Steuerung Warteschlangen immer länger werden – nur darf es in diesem Fall auch kein stabiles Festzeitprogramm geben.

Erst wenn eine vollverkehrsabhängige Steuerung diesem Vergleich standhält, ist sie tatsächlich in der Lage, die potenziell verfügbare Abfertigungskapazität eines Verkehrsknotens voll auszuschöpfen. Erst dann kann eine solche Steuerung überhaupt als ernste Alternative in Betracht gezogen und über die Güte der verwendeten Optimierungsverfahren nachgedacht werden.

1.3 Aufbau und Ziel der Studie

Aufbau

Es bedarf weder komplizierter Szenarien noch komplexer Randbedingungen, um Stabilitätsprobleme vollverkehrsabhängiger Steuerungen sichtbar zu machen. Die analytischen Untersuchungen in den Abschnitten 2 und 3 gehen vom denkbar einfachsten Szenario mit nur zwei Verkehrsströmen aus. Für die Rechenbeispiele werden die Zuflussraten an den Rändern absichtlich konstant gehalten, auf Zwischenzeiten wird bewusst verzichtet. Trotz dieser drastischen Vereinfachungen verhalten sich die untersuchten vollverkehrsabhängigen Steuerungen in den gewählten Beispielen instabil. Zum Einsatz kommen ein prognosebasiertes Optimierungsverfahren, die dynamische Priorisierung der Selbst-Steuerung und eine logikbasierte Zeitlückensteuerung. Die Ursachen, die in den konkreten Beispielen zu instabilem Verhalten führen, werden diskutiert und abschließend verallgemeinert.

Im zweiten Teil der Studie, im Abschnitt 4, wird ein vollverkehrsabhängiger Stabilisierungsmechanismus vorgestellt. Er überwacht im laufenden Betrieb, ob die verwendete Knotensteuerung jeden Verkehrsstrom genauso häufig und bei Bedarf genauso lange bedient wie eine stabile Festzeitsteuerung. Aus der Zustandsüberwachung werden stabilisierende Vorgaben abgeleitet, die entweder direkt zu befolgen oder in Form dynamischer Randbedingungen bei der Optimierung zu berücksichtigen sind. Verhält sich die vollverkehrsabhängige Steuerung von sich aus wie gewünscht, braucht die Zustandsüberwachung niemals aktiv zu werden. Das Befolgen dieser Regeln auf lokaler Ebene garantiert Stabilität im Netz. Bei der Herleitung des Stabilisierungsmechanismus wird angenommen, dass die Verkehrsströme hinreichend genau detektiert werden können, und dass der Abfluss bei Grün immer uneingeschränkt möglich ist. Die Funktionsweise des Mechanismus wird anhand unterschiedlicher Testszenarien veranschaulicht.

Ziel

Diese Studie soll zeigen, dass ein Straßennetz mit verteilten, vollverkehrsabhängigen Knotensteuerungen durchaus die gleiche Verkehrsmenge bewältigen kann wie mit einem angepassten Festzeitprogramm. Gleichzeitig soll aber auch deutlich werden, dass dies nicht der Fall sein muss, solange bestimmte Prinzipien außer Acht gelassen werden. Es ist nicht das Ziel dieser Studie, die verkehrliche Wirkung unterschiedlicher Steuerungsansätze zu untersuchen. Doch dafür, dass moderne oder zukünftige verkehrsabhängige Optimierungsansätze ihre Wirkung überhaupt entfalten können, soll diese Studie die Voraussetzungen darlegen.

2 Lokale Optimierung

Im nicht übersättigten Fall ist jede optimale Lösung stabil. Doch die Suche nach optimalen Lösungen ist fehlerbehaftet – allein schon durch die Beschränktheit der Prognosehorizonte. Daher können vollverkehrsabhängige Steuerungen, die jeden Schalteingriff aus Optimalitätskriterien ableiten, instabil werden. Dies wird in den Abschnitten 2.2 und 2.3 anhand zweier einfacher Beispiele gezeigt. Abschnitt 2.4 führt vor, dass sich das betrachtete Szenario mit einer einfachen Schaltregel verkehrsabhängig stabilisieren lässt. Erst später wird sich herausstellen, dass die gleiche Schaltregel zu Instabilitäten im Netz führt.

2.1 Szenario

Einzelknoten

Alle Betrachtungen dieses Abschnitts beziehen sich auf die zwei Verkehrsströme am Knoten aus Abbildung 2. Andere Ströme sollen keine Rolle spielen und werden beispielsweise parallel mit bedient. Jeder Strom fließt mit konstanter Rate q_1 bzw. q_2 zu. Die Sättigungsverkehrsstärke S_1 bzw. S_2 einer Knotenzufahrt gibt an, mit welcher Rate eine Wartekolonne bei Grün abfließen kann. Selbstverständlich gilt $q_1, q_2, S_1, S_2 > 0$. Um die Rechenbeispiele so einfach wie möglich zu halten, werden Umschaltverluste wie Zwischenzeiten und Anfahrverzögerungen vernachlässigt.

Warteschlangen-Modell

Die Anzahl der zum Zeitpunkt t auf einer Knotenzufahrt wartenden Fahrzeuge wird mit $n_1(t)$ bzw. $n_2(t)$ bezeichnet. Da der Verkehr als fluides Medium behandelt wird, kann die Warteschlangenlänge kontinuierliche Werte annehmen. Gemäß dem vertikalen-Warteschlangen-Modell entspricht ihre zeitliche Änderungsrate der Differenz aus Zu- und Abfluss. Wie O’Flaherty u. Bell (1996); Jin u. Heydecker (1998) genauer ausführen, steht $n(t)$ für die Anzahl der Fahrzeuge, die bis zum Zeitpunkt t im Falle freien Verkehrs bereits die Haltelinie passiert haben könnten, abzüglich derer, die bis dahin tatsächlich abgeflossen sind. Weil niemals mehr Fahrzeuge abfließen können als vorher zugeflossen sind, gilt $n_1(t), n_2(t) \geq 0$. Die Integration der Warteschlangenlängen über der Zeit liefert die Gesamtwartezeiten aller Fahrzeuge.² Diese zu minimieren sei das Ziel der folgenden Optimierungsverfahren.

²Der zeitliche Aspekt des Verkehrsablaufs, wie z.B. die Zeitpunkte der Stauauflösung und die Menge der anfallenden Wartezeiten, wird vom verwendeten Modell korrekt erfasst. Eine Konsistenzprüfung wird beispielsweise von Helbing u. a. (2007) durchgeführt. Zur Schätzung der Rückstaulänge (in Metern) sind andere Modelle, insbesondere das von Helbing u. a. (2005) vorgestellte, geeigneter. Einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Aspekte der mikro- und makroskopischen Verkehrsmodellierung gibt Helbing (1997, 2001).

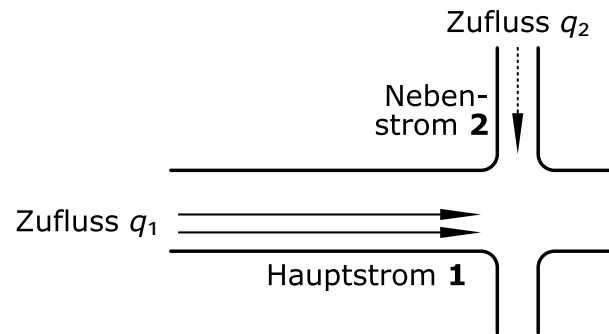


Abbildung 2: Einfacher lichtsignalgesteuerter Verkehrsknoten mit zwei konfliktbehafteten Strömen.

2.2 Prognosebasierte Optimierung

Ansatz

Ein gängiger Ansatz zur dynamischen Optimierung des Verkehrsablaufs ist es, die Auswirkungen verschiedener Schaltfolgen über einen bestimmten Zeithorizont modellbasiert zu prognostizieren. Die Schaltfolge, von der im Sinne einer gewählten Zielfunktion die beste Wirkung innerhalb des Prognosehorizonts zu erwarten ist, wird ausgewählt und am Knotenpunkt zur Anwendung gebracht. Nach kurzer Zeit wird der Optimierungsprozess aufs Neue durchlaufen, wobei sich für den neuen, etwas weiter in die Zukunft verschobenen Prognosehorizont, eine andere Schaltfolge als noch besser herausstellen kann. Jeder Schaltzustand ist somit optimal abgestimmt auf die aktuelle Verkehrssituation und ihre Entwicklung innerhalb des Prognosehorizonts. Abbildung 3 veranschaulicht das Grundprinzip.

Zahlreiche Steuerungsverfahren basieren auf diesem Ansatz. Eine detaillierte Darstellung geben beispielsweise Gartner (1983) für OPAC, Henry u. a. (1983) für PRODYN, Mauro u. Taranto (1990) für UTOPIA, Boillot u. a. (1992) für CRONOS und Porche u. a. (1996) für ALLONS-D. Im Wesentlichen unterscheiden sich die aufgeführten Steuerungen darin, wie sie das resultierende Optimierungsproblem lösen. OPAC enumeriert den Lösungsraum vollständig, PRODYN verwendet eine Heuristik und ALLONS-D durchsucht einen komplexen Entscheidungsbaum mittels Backtracking. Nicht bei allen Verfahren ist der Prognosehorizont fest, bei ALLONS-D passt er sich den Verkehrsstärken an, und manche, wie beispielsweise UTOPIA, berücksichtigen zudem die Verkehrsentwicklung an den umliegenden Knoten.

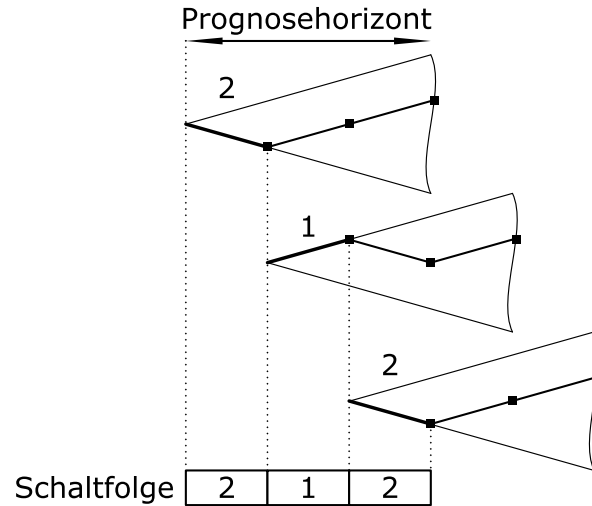


Abbildung 3: Grundprinzip eines prognosebasierten Optimierungsverfahrens nach Porche u. a. (1996). In jedem Optimierungsschritt (dreieckige Felder) wird die Schaltfolge ermittelt, mit der sich der Verkehrsablauf innerhalb des Prognosehorizontes bestmöglich entwickelt. Durch permanente Reoptimierung (Verschiebung nach rechts) wird die Schaltfolge vorausschauend veränderlichen Verkehrssituationen angepasst.

Beispiel

Das Grundprinzip prognosebasierter Optimierungsverfahren soll nun auf den Knotenpunkt aus Abbildung 2 angewendet werden. Für das Rechenbeispiel sei die Hauptstraße drei- und die Nebenstraße einstreifig. Damit können ihre maximalen Abflussraten mit $S_1 = 3 \text{ Fz}/1.8 \text{ s}$ und $S_2 = 1 \text{ Fz}/1.8 \text{ s}$ angesetzt werden, was laut RiL (1992) der üblichen Sättigungsverkehrsstärke von $2000 \text{ Fz}/\text{h}$ je Fahrstreifen entspricht. Die konstanten Zuflussraten seien $q_1 = 0.8 S_1$ bzw. $q_2 = 0.1 S_2$, womit der Knotenpunkt zu 90% ausgelastet ist. In dieser Situation wäre ein Festzeitprogramm stabil, das beispielsweise innerhalb eines 100er Umlaufs mindestens 80s Grün für den Haupt- und mindestens 10s für den Nebenstrom vorsieht. Für das Optimierungsverfahren wird ein Prognosehorizont von $h = 60 \text{ s}$ angenommen.

Die nachfolgenden Rechenschritte können in Abbildung 4 nachvollzogen werden. Zum betrachteten Zeitpunkt warten auf der Nebenstraße $n_2 = 5$ Fahrzeuge während der Hauptstrom frei fließt. Das Optimierungsverfahren muss nun entscheiden, wann zur Nebenstraße umgeschaltet werden soll: entweder sofort oder zu einem späteren Zeitpunkt. Im ersten Fall (Variante A) wird für das sofortige Leeren der Nebenstraße eine Grünzeit von

$$g_2 = \frac{n_2}{S_2 - q_2} = 10 \text{ s} \quad (1)$$

benötigt. Während dieser Zeit werden auf der Hauptstraße $g_2 q_1$ Fahrzeuge aufgehalten.

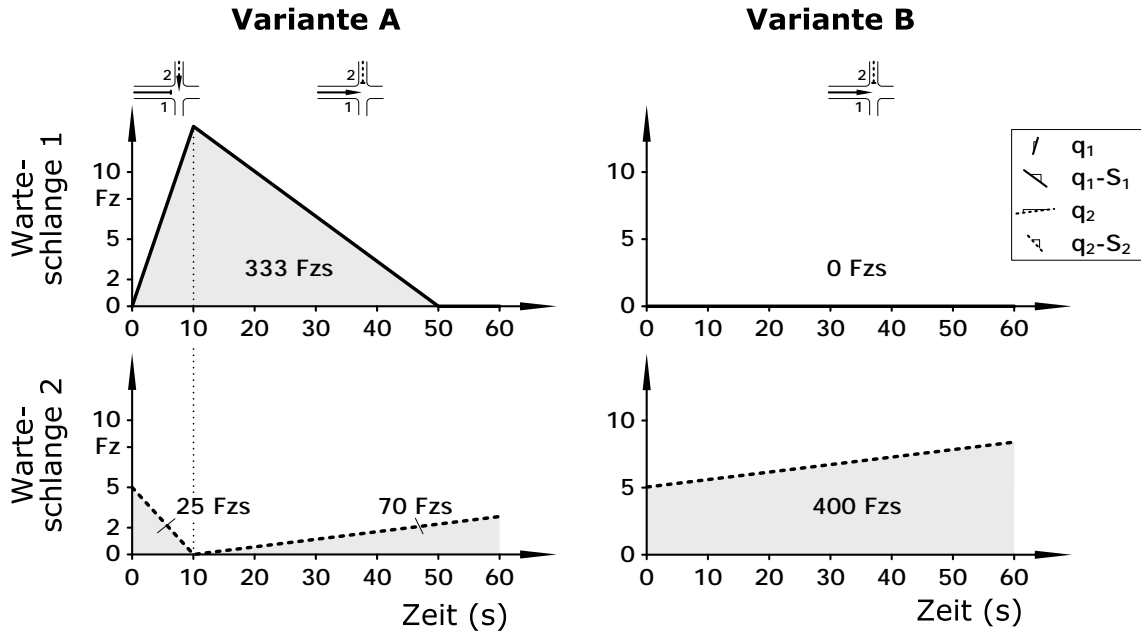


Abbildung 4: Wartezeitenbilanz für zwei unterschiedliche Schaltvarianten. Sie gibt Aufschluss darüber, ob die fünf auf der Nebenstraße wartenden Fahrzeuge sofort (Variante A) oder im Extremfall erst außerhalb des Optimierungshorizonts (Variante B) abgeferigt werden sollen. Für jede Variante ist der zeitliche Verlauf der Warteschlangen auf der Haupt- (oben) und der Nebenstraße (unten) innerhalb des Prognosehorizonts aufgetragen. Die Fläche unter den Kurven entspricht der Gesamtwartezeit.

Dort ist die Warteschlange bei anschließendem Zurückschalten nach

$$g_1 = \frac{g_2 q_1}{S_1 - q_1} = 40 \text{ s} \quad (2)$$

wieder aufgelöst. Es sei angenommen, dass das Grün für die Hauptstraße dann noch weitere 10s, bis ans Ende des Optimierungshorizonts, beibehalten wird. Für Variante A, d.h. 10s Grün für die Neben- und 50s für die Hauptstraße, ist der zeitliche Verlauf der Warteschlangen in Abbildung 4 links aufgetragen. Die mit ihr verbundene Gesamtwartezeit W^A ergibt sich aus der Fläche unter den Kurven und entspricht

$$W^A = g_2 q_1 (g_1 + g_2) / 2 + n_2 g_2 / 2 + (h - g_2)^2 q_2 / 2 = 428 \text{ Fzs.} \quad (3)$$

Damit die Nebenstraße sofort bedient wird, darf es keine andere Schaltfolge mit geringeren Gesamtwartezeiten geben.

Jede andere Schaltfolge verlängert die Grünzeit der Hauptstraße und zögert das Umschalten weiter hinaus. Der Extremfall, die Nebenstraße überhaupt nicht bzw. erst am Ende des Optimierungshorizonts zu bedienen (Variante B), ist in Abbildung 4 rechts auf-

gezeigt. Interessanterweise sind die dabei anfallenden Gesamtwartezeiten

$$W^B = n_2 h + q_2 h^2 / 2 = 400 \text{ Fzs} \quad (4)$$

geringer als die 428 Fzs von Variante A. Selbst wenn sich frühere Umschaltzeitpunkte als noch besser erweisen, ist sicher: Um die Gesamtwartezeiten innerhalb des Optimierungshorizonts zu minimieren, dürfen die fünf auf der Nebenstraße wartenden Fahrzeuge jetzt noch nicht abgefertigt werden.

Aber wie die Zeit fortschreitet, werden neue Optimierungsschritte durchgeführt. Dabei wird der ursprünglich ausgewählte Umschaltzeitpunkt, noch bevor dieser erreicht wird, immer weiter hinausgeschoben. Kommt auf der Nebenstraße ein weiteres Fahrzeug hinzu, bildet sich ein noch stärkeres Ungleichgewicht zugunsten späterer Umschaltzeitpunkte heraus. Die obigen Formeln (1) bis (4), in die nun $n_2 = 6$ Fz einzusetzen ist, liefern dann

$$W^A = 580 \text{ Fzs} \quad \text{und} \quad W^B = 460 \text{ Fzs}. \quad (5)$$

Anstatt die größer gewordene Warteschlange möglichst rasch zu leeren (Variante A), scheint es lohnender, diese noch weiter wachsen zu lassen (Variante B). Das ist damit zu erklären, dass die Leerung der größeren Warteschlange mehr Zeit beansprucht und der stark ausgelastete Hauptstrom in Folge dessen länger aufgehalten werden muss. Gegen die dabei entstehenden Wartezeiten fällt die auf der Nebenstraße immer weiter wachsende Warteschlange innerhalb des beschränkten Prognosehorizonts kaum ins Gewicht. Letztlich wird das Optimierungsverfahren, wie Abbildung 5 zeigt, sich jedes Mal für einen späteren Umschaltzeitpunkt entscheiden. Tatsächlich umschalten wird es jedoch nie. Die Warteschlange divergiert, obwohl es für die gleiche Situation ein stabiles Festzeitprogramm gibt.

Diskussion

Lichtsignalsteuerungen unterliegen Randbedingungen, die hier zugunsten der Einfachheit vernachlässigt wurden. Aber auch wenn diese berücksichtigt werden, gibt es einiges zu beachten: Zwischenzeiten fallen beim Leeren der Nebenstraße doppelt an, sowohl beim Hin- als auch beim Zurückschalten. Weil diese zusätzliche Verluste für Variante A bedeuten, wäre instabiles Verhalten dann bereits bei weniger ungleichen Streifenanzahl- und Zuflussverhältnissen zu erwarten. Auch die Bedingung, maximale Rotzeiten nicht zu überschreiten, würde die Situation nicht zwangsläufig stabilisieren. Denn solange nicht zusätzlich garantiert werden kann, dass die Nebenstraße auch hinreichend lange Grün bekommt, würde die Optimierung sofort nach Ablauf einer Mindestgrünzeit wieder zurück zur Hauptstraße schalten, noch bevor die Nebenstraße geleert wurde und noch bevor mindestens so viele

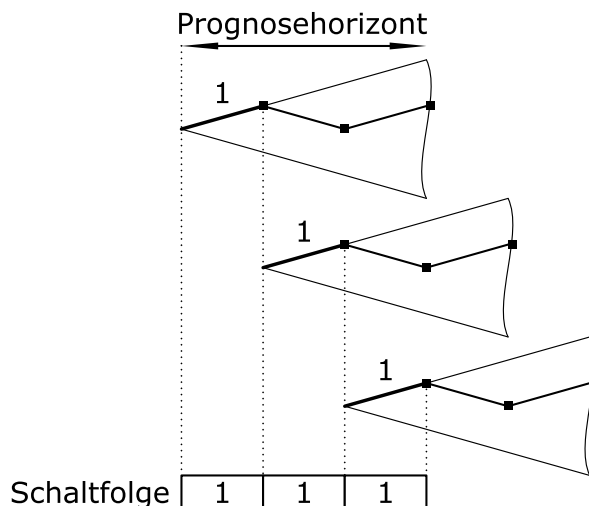


Abbildung 5: Instabiles Verhalten eines prognosebasierten Optimierungsverfahrens. Der geplante Umschaltzeitpunkt wird in jedem Optimierungsschritt immer weiter hinausgeschoben. Dem beschränkten Prognosehorizont bleiben die langfristigen Verluste verborgen, sichtbar ist nur was sich kurzfristig auszahlt.

Fahrzeuge abgeflossen sind wie innerhalb einer Bedienperiode neu hinzukommen.

Manche Entscheidungen, wie in diesem Fall das regelmäßige Leeren der Nebenstraße, zahlen sich erst über längere Zeiträume aus. Kurzfristige Verluste innerhalb eines beschränkten Prognosehorizonts können bewirken, dass notwendige Maßnahmen aufgeschoben oder nicht nachhaltig genug angewendet werden. Wie das Beispiel zeigen konnte, kann die lokale Optimierung allein nicht dieselbe Verkehrsmenge bewältigen wie eine auf die Situation angepasste Festzeitsteuerung.

2.3 Dynamische Priorisierung

Ansatz

Es gibt eine Möglichkeit, die Komplexität der Lösungsbaum-Suche aufzubrechen. Das von Lämmer (2007); Lämmer u. Helbing (2008) vorgestellte Optimierungsverfahren berechnet für jeden Strom lediglich eine reelle Zahl, den Prioritätsindex π . Die Prioritätsindizes π haben die interessante Eigenschaft, dass sich aus ihrer absteigenden Sortierung die optimale Bedienreihenfolge der zugehörigen Verkehrsströme ergibt: der am höchsten priorisierte ist als erster zu bedienen. Sobald der π -Wert des ausgewählten Verkehrsstroms unter den eines anderen fällt, beispielsweise weil ein Rückstau aufgelöst wurde oder sich woanders eine größere Fahrzeugkolonne nähert, wird umgeschaltet. In die Formel zur Berechnung von π gehen die dynamischen Zustandsgrößen des Verkehrsstroms ein, beispielsweise die Zahl der bereits wartenden und das zeitliche Ankunftsprofil der noch zufließenden Fahrzeuge. Mit dieser impliziten Form der Optimierung werden die antizipierten Gesamtwarenzei-

ten all jener Fahrzeuge minimiert, die vom aktuellen Schaltzustand unmittelbar betroffen sind.

Beispiel

Indirekt verfolgt die dynamischen Priorisierung das Prinzip der Abfluss-Maximierung. Unter den speziellen Annahmen (konstante Zuflussraten, keine Zwischenzeiten) vereinfacht sich die π -Formel dahingehend, dass sein Wert der mittleren zu erwartenden Abflussrate im nachfolgenden Bedienvorgang entspricht.³

Auf das Beispiel angewendet, ergeben sich mit den Zahlenwerten aus Abschnitt 2.2 für den Haupt- und Nebenstrom die Prioritäten

$$\pi_1 = q_1 = 1,33 \text{ Fz/s} \quad \text{bzw.} \quad \pi_2 = S_2 = 0,56 \text{ Fz/s.} \quad (6)$$

Die Hauptstraße ist höher priorisiert, weil dort mehr Fahrzeuge je Sekunde abfließen können. Die Priorität der Nebenstraße kann nicht weiter anwachsen, selbst wenn ihr Rückstau immer größer wird: die zu erwartende Abflussrate bleibt die Gleiche. Es wird niemals zur Nebenstraße umgeschaltet.

Diskussion

Die Nebenstraße zu bedienen hieße, den Knotenpunkt vorübergehend mit geringerem Durchsatz zu betreiben. Zwar würden die Fahrzeuge der Nebenstraße auf lange Sicht zur Erhöhung des mittleren Durchsatzes beitragen, aber das zeigt sich erst außerhalb des beschränkten Prognosehorizonts. Somit ist auch dieses lokale optimierende Verfahren instabil.

2.4 Logiksteuerung

Ansatz

Ein anderer zielführender Ansatz zum Entwurf einer wirkungsvollen verkehrsabhängigen Steuerung ist folgender: Man gibt ein gewünschtes (gegebenenfalls optimales) Schaltverhalten vor und leitet daraus die Schaltregeln ab, die dieses Verhalten dynamisch erzeugen. Eine regelungstheoretisch motivierte Vorgehensweise zum Ableiten solcher Regeln stellen Lefeber u. Rooda (2006); van Eekelen u. a. (2007) vor. Sobald die Schaltregeln gefunden

³In diesem Spezialfall reduziert sich die dynamische Priorisierung auf die von Smith (1956) entdeckte und von McNaughton (1959) genauer untersuchte μc -Strategie. Wie Rothkopf u. Smith (1984) beweisen, gibt es neben der μc -Strategie keine andere Strategie zur Wartezeit-optimalen Priorisierung statischer Warteschlangen.

sind, lassen sie sich leicht in Steuerungslogiken umsetzen, beispielsweise unter Verwendung von VS-PLUS, LISA+, SITRAFFIC Language oder VISVAP.

Für den zweiarmigen Einzelknoten aus Abbildung 2 sind die Regeln, die zum optimalen Schaltverhalten führen, bereits von Hofri u. Ross (1987); van Oyen u. a. (1992) herausgestellt und analysiert worden: Im Falle vernachlässigbarer Zwischenzeiten ist es immer optimal, sofort nachdem eine Warteschlange vollständig geleert wurde, umzuschalten und die andere zu leeren.⁴ Wann eine Warteschlange vollständig geleert wurde, kann auf verschiedene Weise festgestellt werden. Lämmer (2007) schlägt hierfür einen Vergleich der Zeitreihen der zu- und abfließenden Fahrzeuge vor, aber ebenso eignen sich die von Karstrinaki u. a. (2003); Döge (2004); Litzenberger u. a. (2007) vorgestellten Methoden der Videodetektion. Weniger aufwändig und gleichsam wirkungsvoll ist das Messen der Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen im abfließenden Strom. Eine solche Zeitlückensteuerung ließe sich beispielsweise mit der Ablauflogik aus Abbildung 6 umsetzen.

Dynamisches Verhalten

Nun soll herausgearbeitet werden, wie sich eine Steuerung verhält, die am Einzelknoten aus Abbildung 2 beide Schlangen abwechselnd leert. Hierzu wird zunächst der zeitliche Verlauf der Warteschlangen in einer vollen Bedienperiode berechnet, dann verallgemeinert und zuletzt auf Stabilität geprüft.

Die nachfolgenden Berechnungsschritte können in Abbildung 7 nachvollzogen werden. Zu Beginn warten auf der Nebenstraße $n_2(t_0) = n_2^0$ Fahrzeuge, während die Warteschlange der Hauptstraße vollständig geleert ist. Gemäß der verwendeten Schaltregel wird die Steuerung sofort zur Nebenstraße umschalten. Dort ist die Warteschlange nach $n_2^0/(S_2 - q_2)$ Sekunden abgebaut. Währenddessen stauen sich auf der Hauptstraße

$$n_1(t_1) = \frac{n_2^0 q_1}{S_2 - q_2} \quad (7)$$

Fahrzeuge an. Nach dem Zurückschalten zur Hauptstraße benötigt das Auflösen des Rückstaus $n_1(t_1)/(S_1 - q_1)$ Sekunden, in denen die Warteschlange der Nebenstraße auf

$$n_2(t_2) = \frac{n_2^0 q_1 q_2}{(S_1 - q_1)(S_2 - q_2)} \quad (8)$$

Fahrzeuge anwächst. Damit ist eine volle Bedienperiode durchlaufen.

Der Zustand am Ende der ersten Periode ist bis auf einen konstanten Faktor a identisch

⁴Falls Zwischenzeiten eine Rolle spielen und falls zudem eine der beiden Zufahrten sehr viel mehr Fahrstreifen hat und sehr viel stärker ausgelastet ist, kann es besser sein, ihr über die Leerung der Warteschlange hinaus die Grünzeit zu verlängern. Auf diesen Spezialfall gehen Chase u. Ramadge (1992) ein.

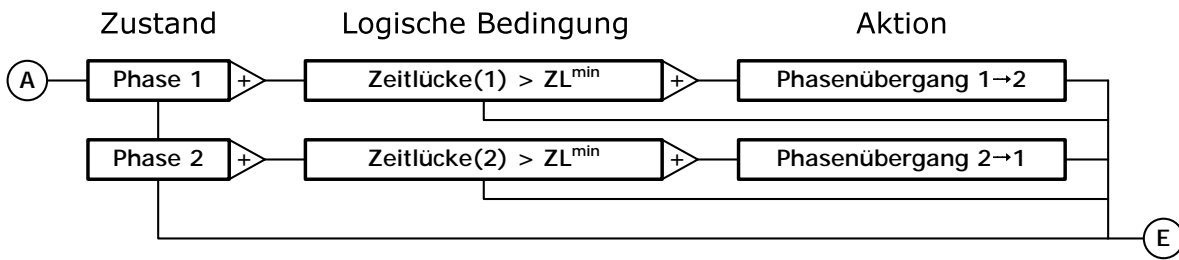


Abbildung 6: Ablaufdiagramm einer logikbasierten Zeitlückensteuerung, die am Knotenpunkt aus Abbildung 2 beide Warteschlangen abwechselnd leert. Das Diagramm wird in jedem Zeitschritt von A nach E durchlaufen. Sobald die Zeitlücke der abfließenden Fahrzeuge größer ist als eine geeignet gewählte Mindestzeitlücke ZL^{\min} , wird in die andere Phase umgeschaltet.

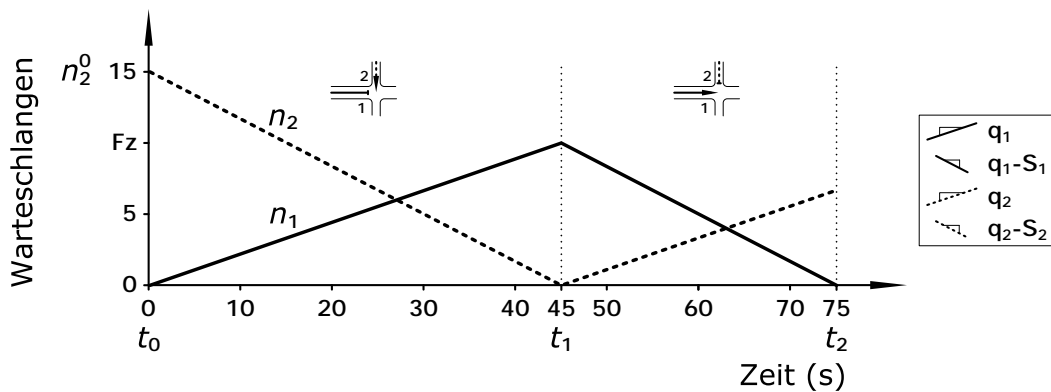


Abbildung 7: Verlauf der Warteschlangen am Knotenpunkt aus Abbildung 2 mit einer Steuerung, die beide Warteschlangen abwechselnd leert. Die Zahlenwerte gelten für $n_2^0 = 15 \text{ Fz}$, $S_1 = S_2 = 1 \text{ Fz}/1,8 \text{ s}$ und $q_1 = q_2 = 0,4 \text{ Fz}/1,8 \text{ s}$.

zum Anfangszustand. Daraus lässt sich eine rekursive Entwicklungsvorschrift

$$n^k = a n^{k-1} \quad \text{mit} \quad a = \frac{q_1 q_2}{(S_1 - q_1)(S_2 - q_2)} \tag{9}$$

für die am Ende von Periode k wartenden Fahrzeuge ableiten. In Abhängigkeit von a werden die Warteschlangen von Periode zu Periode schrumpfen oder anwachsen.

Stabilitätseigenschaften

Die Entwicklungsvorschrift (9) konvergiert, falls $a < 1$. Diese Stabilitätsbedingung lässt sich in

$$\frac{q_1}{S_1} + \frac{q_2}{S_2} < 1 \tag{10}$$

umschreiben, wobei jeder der beiden Summanden der Auslastung eines Verkehrsstroms entspricht. Demnach ist die verwendete Logiksteuerung stabil, wenn die Summe der Aus-

lastungen beider Ströme kleiner als eins ist. Dies ist gleichzeitig die Bedingung für die Existenz eines stabilen Festzeitprogramms, wie Savkin (1998) beweist. Abbildung 8 stellt den stabilen Bereich in der q_1 - q_2 -Ebene grafisch dar.

Soweit wurde lediglich gezeigt, dass sich der Knotenpunkt vom konkreten Anfangszustand aus stabilisieren lässt. Um globale Stabilität nachzuweisen ist noch zu zeigen, dass jeder beliebige Anfangszustand in einen solchen Zustand mit mindestens einer leeren Warteschlange übergeht. Dies ist der Fall, wenn sich die Warteschlangen in endlicher Zeit leeren lassen, also wenn

$$q_1 < S_1 \quad \text{und} \quad q_2 < S_2 \quad (11)$$

gelten. Da beide Voraussetzungen bei erfüllter Stabilitätsbedingung (10) automatisch vorliegen, handelt es sich um globale Stabilität.

Trägt man den zeitlichen Verlauf der Warteschlangen gegeneinander auf, wie in Abbildung 9 (rechts), so lässt sich ihre Entwicklung als Trajektorie verfolgen. Im stabilen Fall strebt die Trajektorie gegen einen globalen Attraktor, der im vorliegenden Fall die Gestalt eines Grenzzyklus hat. Die Schaltfolge des Grenzzyklus entspricht einem Festzeitprogramm mit theoretischer Mindestumlaufzeit Lämmer (2007). Unter der speziellen Annahme verschwindend kleiner Zwischenzeiten geht der Grenzzyklus, wie in Abbildung 9 (oben) zu erkennen, in den Punkt (0,0) über. Das heißt, theoretisch würde es der Logiksteuerung gelingen, beide Warteschlangen gleichzeitig in den geleerten Zustand zu überführen und dort zu halten. Die Kurven für den realistischeren Fall mit Zwischenzeiten werden von Lämmer (2007) analytisch hergeleitet. Sie sind in Abbildung 9 (unten) zu sehen.

Diskussion

Eine Logiksteuerung, die am Knotenpunkt aus Abbildung 2 beide Warteschlangen abwechselnd leert, hat hervorragende Stabilitätseigenschaften: Sie ist vollverkehrsabhängig und kann genau dieselbe Verkehrsmenge bewältigen wie eine angepasste Festzeitsteuerung. Zudem strebt sie stets gegen einen Zustand mit kürzest möglichen Bedienfolgezeiten und niedrigem (von Sonderfällen abgesehen sogar niedrigstem) Warteschlangenniveau.

Nach van Oyen u. a. (1992); Bramson (2008) gilt das Gleiche bei zufälligen Ankunftsprozessen, solange die Einzelankünfte stochastisch unabhängig sind. Dies steht scheinbar im Widerspruch zur Beobachtung von Webster (1958): „*When traffic is of a truly random character the minimum cycle is associated with infinite delay.*“ Tatsächlich hat eine Festzeitsteuerung bei minimaler Umlaufzeit keinerlei Reserven zur Kompensation von Zuflussschwankungen. Die verkehrsabhängige Logiksteuerung ist dagegen in der Lage, zufällige Störungen unmittelbar auszuregeln: Falls aus einer Richtung mehr Fahrzeuge ankommen, so bekommt diese ganz von selbst – weil die Rückstauauflösung länger dauert – länger

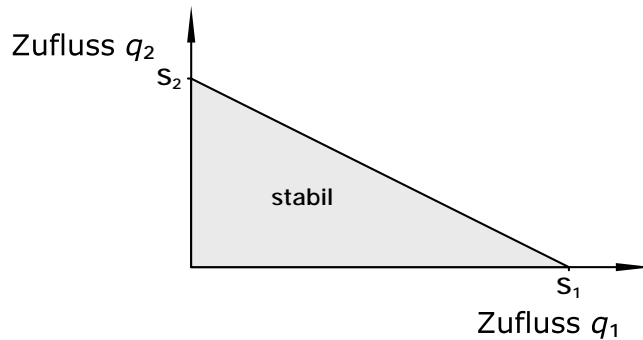


Abbildung 8: Die im Stabilitätsbereich (markierte Fläche) liegenden Zufluss-Konstellationen lassen sich am Einzelknoten mit einer Logiksteuerung, die beide Schlangen abwechselnd leert, stabilisieren. Dies ist gleichzeitig auch der Bereich, in dem sich ein stabiles Festzeitprogramm finden lässt.

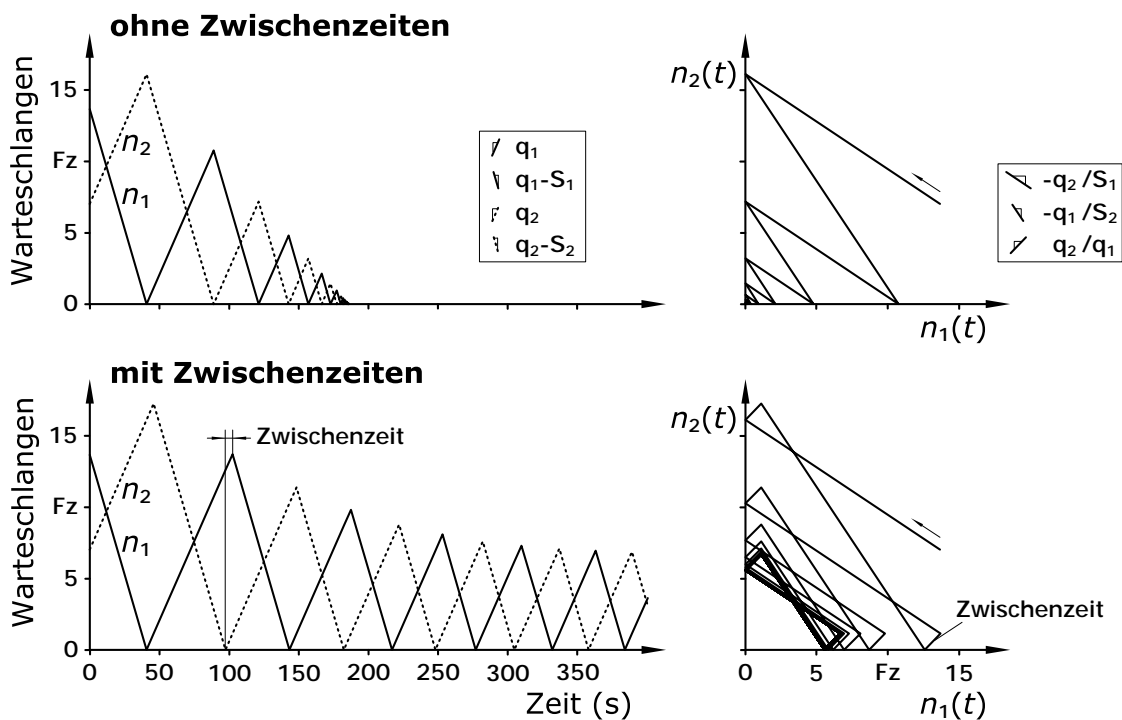


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf stabiler Warteschlangen (links) und zugehörige Zustandstrajektorie (rechts). Oben: Im theoretischen Fall ohne Zwischenzeiten würden die Warteschlangen exponentiell von Periode zu Periode, doch linear in der Zeit, immer kleiner werden und dann im geleerten Zustand verbleiben. Unten: Im realistischeren Fall mit Zwischenzeiten strebt die Trajektorie gegen einen Grenzzyklus, dessen Schaltfolge einem Festzeitprogramm mit Mindestumlaufzeit entspricht. Den Kurven liegen $S_1 = S_2 = 1 \text{ Fz}/1,8 \text{ s}$, $q_1 = q_2 = 0,4 \text{ Fz}/1,8 \text{ s}$ und eine Zwischenzeit von 5 s zugrunde.

Grün. Falls weniger kommen, sind die Grünzeiten kürzer. Die Fähigkeit zum dynamischen Ausregeln von Störeinflüssen ist eine besondere Stärke verkehrsabhängiger Steuerungen.

3 Wechselwirkungen im Netz

Möchte man vollverkehrsabhängige Steuerungen im Netz betreiben, so ist ein entscheidender Faktor zu berücksichtigen: Die Einzelankünfte an einem Knoten sind nun mehr unabhängig. Sie resultieren aus dem Schaltverhalten der umliegenden Knotenpunkte, welches aufgrund der Kopplung durch die Verkehrsströme wiederum vom Schaltverhalten des betrachteten Knotens abhängt. Damit bildet das Netz aus vollverkehrsabhängig gesteuerten Knoten ein eigenes dynamisches System, das neue komplexe Verhaltensmuster entstehen lässt.

Am Beispiel der Logiksteuerung, die im vorigen Abschnitt hervorragende Stabilitätseigenschaften am Einzelknoten aufzeigen konnte, wird nun untersucht, wie sich ein Netz aus nur zwei Knoten dynamisch aufschaukeln und noch unterhalb Sättigungsgrenze instabil werden kann.

3.1 Szenario

Straßennetz

Gegenstand der Untersuchung ist das Straßennetz aus Abbildung 10. Es besteht aus zwei Knotenpunkten und zwei symmetrisch verschränkten Verkehrsströmen.⁵ Jeder der Knoten ist – wie der Einzelknoten des vorigen Abschnitts – eine Kreuzung von zwei Strömen. Die Fahrzeuge fließen am linken bzw. rechten Rand des Netzes mit den konstanten Raten q_1 bzw. q_2 zu, passieren den jeweils ersten Knoten über eine zweistreifige Geradeausspur, biegen am nächsten einstreifig nach links ab und verlassen dann das Netz. Aufgrund der Streifenanzahlen gelte für die maximalen Abflussraten $S_1 = S_{1'} = 2S$ und $S_2 = S_{2'} = S$, wobei S für die Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens steht. Neben den Umschaltverlusten werden hier zusätzlich auch die Reisezeiten zwischen den Knotenpunkten vernachlässigt. Damit gelten die gleichen Voraussetzungen wie im Abschnitt 2.1.

Referenz Festzeitsteuerung

Jeder der beiden Knoten wird wieder mit einer vollverkehrsabhängigen Steuerung betrieben. Dabei kommt die im Abschnitt 2.4 untersuchte Logiksteuerung zum Einsatz, die beide Warteschlangen abwechselnd leert. Um später ihre Stabilitätseigenschaften beurteilen zu können, muss zunächst geklärt werden, wann sich das Netz mit einer Festzeitsteuerung stabilisieren lässt. Dies ist bei vernachlässigbaren Zwischenzeiten nach Savkin (1998) der Fall, wenn an jedem Knoten die Auslastungen der zufließenden Verkehrsströme in der

⁵Ein Netz dieser Struktur wird, der detaillierten Untersuchung von Rybko u. Stolyar (1992) würdigend, auch Rybko-Stolyar-Netzwerk genannt. Laut Bramson (2008) ist es der Gruppe der Kumar-Seidman-Netzwerke zuzuordnen, da es von Kumar u. Seidman (1990) zuerst in Augenschein genommen wurde.

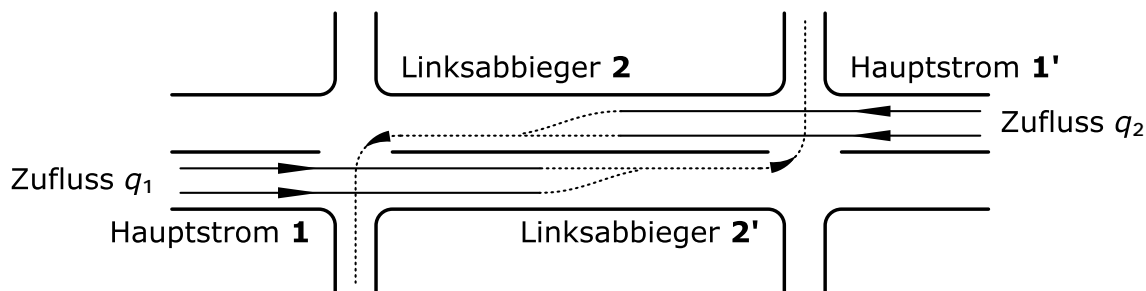


Abbildung 10: Einfaches Straßennetz mit zwei Knoten und zwei symmetrisch verstränkten Verkehrsströmen nach Kumar u. Seidman (1990); Rybko u. Stolyar (1992). Jeder Knoten wird unabhängig vom anderen gemäß der Schaltregel, beide Schlangen abwechselnd zu leeren, vollverkehrsabhängig gesteuert.

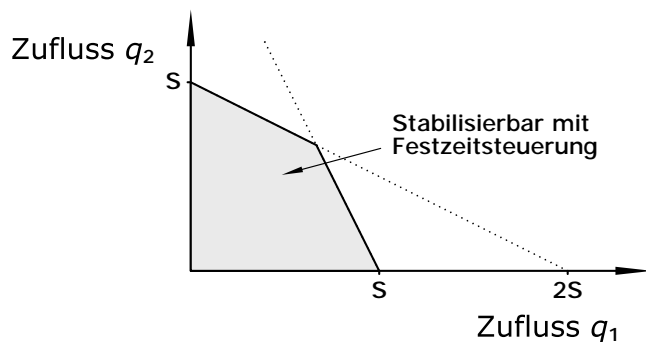


Abbildung 11: Befinden sich die Zuflüsse q_1 und q_2 im markierten Bereich, lässt sich das Straßennetz aus Abbildung 10 mit einer Festzeitsteuerung stabilisieren.

Summe kleiner als eins sind. Es muss also gelten:

$$\frac{q_1}{2S} + \frac{q_2}{S} < 1 \quad \text{und} \quad \frac{q_1}{S} + \frac{q_2}{2S} < 1. \quad (12)$$

Der zugehörige Stabilitätsbereich ist in Abbildung 11 aufgetragen. Nun kann damit begonnen werden, das dynamische Verhalten der vollverkehrsabhängigen Steuerungen genauer zu betrachten.

3.2 Dynamisches Aufschaukeln

Dazu soll eine volle Schaltperiode, wie sie Abbildung 12 zeigt, berechnet werden. Anfangs warten am Zufluss des linken Knotens $n_1(t_0) = n_1^0$ Fahrzeuge, alle anderen Warteschlangen sind geleert. Gemäß der lokalen Schaltregel, beide Schlangen abwechselnd zu leeren, wird am linken Knoten sofort mit der Leerung der Warteschlange begonnen. Die abgefertigten Fahrzeuge fließen am rechten Knoten mit der Rate $2S$ zu und bewirken dort (unter Vernachlässigung der Reisezeiten) das sofortige Umschalten zu den Linksabbiegern. Weil sie dort aber lediglich einstreifig mit der Rate S abfließen können, wird sich, bis die

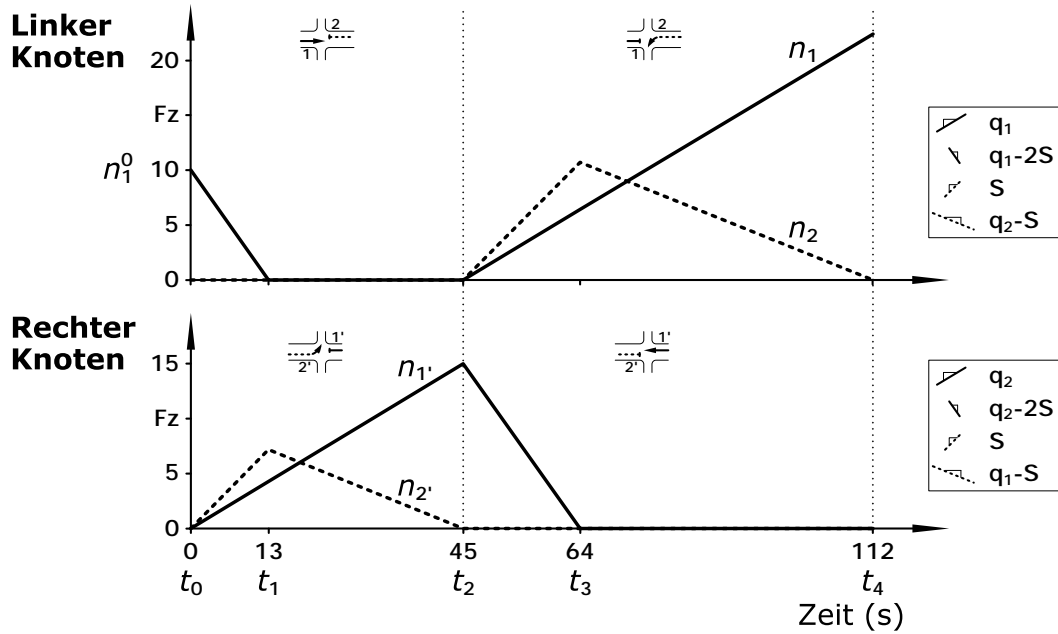


Abbildung 12: Verlauf der Warteschlangen während einer vollen Periode. An jedem Knoten werden beide Schlangen abwechselnd geleert. Dabei schaukeln sie sich gegenseitig auf: Der rechte Knoten hat im Zeitraum $[t_1, t_2]$ die meiste Verkehrslast, danach der linke im Zeitraum $[t_3, t_4]$. Am Ende der Periode ist die erste Warteschlange größer als zu Beginn. Simulationsvideos unter <http://stefanlaemmer.de/stability> veranschaulichen das Problem. Die Zahlenwerte gelten für $n_1^0 = 30$ Fz, $q_1 = q_2 = 0.6 S$ und $S = 1$ Fz/1, 8 s.

erste Schlange nach $n_1^0/(2S - q_1)$ Sekunden geleert ist, ein Rückstau mit

$$n_{2'}(t_1) = n_1^0 \frac{S}{2S - q_1} \quad (13)$$

Fahrzeugen gebildet haben. Zu diesem Zeitpunkt hat der linke Knoten keine Warteschlange mehr und wird mangels Alternativen⁶ weiter den Zufluss abfertigen. Die links zufließenden Fahrzeuge treffen also mit der Rate q_1 am rechten Knoten auf die Warteschlange der Abbieger und zögern ihre Leerung bis zum Zeitpunkt $t_2 = t_0 + n_1^0/(S - q_1)$ hinaus. Die Warteschlange am rechten Zufluss ist bis dahin auf

$$n_{1'}(t_2) = n_1^0 \frac{q_2}{S - q_1} \quad (14)$$

Fahrzeuge angewachsen. Dieser Zustand ist symmetrisch zum Anfangszustand, weshalb seine weitere Entwicklung mit paarweise vertauschten Indizes in gleicher Weise berechnet

⁶Ein Umschalten zur leeren Linksabbiegerspur würde den Hauptstrom aufhalten und hätte das sofortige Zurückschalten zur Folge.

werden kann. Nach einer vollen Periode warten am Zufluss des linken Knotens

$$n_1(t_4) = n_1^0 \frac{q_1}{S - q_1} \frac{q_2}{S - q_2} \quad (15)$$

Fahrzeuge, während alle anderen Warteschlangen geleert sind. Damit entspricht der Zustand am Ende der ersten Periode wieder einem Vielfachen a des Anfangszustands. Die rekursive Entwicklungsvorschrift lautet in diesem Fall

$$n^k = a n^{k-1} \quad \text{mit} \quad a = \frac{q_1}{S - q_1} \frac{q_2}{S - q_2}, \quad (16)$$

wobei k die Perioden zählt. Nur falls $a < 1$, werden die Rückstaus von Periode zu Periode kleiner und nur dann liegt Stabilität vor.

3.3 Stabilitätsverlust

Bringt man die Stabilitätsbedingung $a < 1$ in die Form

$$\frac{q_1}{S} + \frac{q_2}{S} < 1, \quad (17)$$

so wird deutlich, dass diese einen kleineren Bereich abdeckt als die Bedingung (17) für die Existenz eines stabilen Festzeitprogramms. Beispielsweise lässt sich das Straßennetz für die Zuflüsse $q_1 = q_2 = 0,6 S$ mit einer Festzeitsteuerung stabilisieren ($0,3 + 0,6 < 1$ und $0,6 + 0,3 < 1$), nicht jedoch mit der vollverkehrsabhängigen Logiksteuerung ($0,6 + 0,6 > 1$). Der grafische Vergleich beider Stabilitätsbereiche in Abbildung 13 macht den Stabilitätsverlust deutlich.

Typisch für diesen Fall dynamischer Instabilität ist, dass sich an den Knoten Zeitintervalle mit besonders hoher und solche mit besonders geringer Verkehrsmenge abwechseln. Im Zeitraum $[t_1, t_2]$ lässt sich beispielsweise Folgendes beobachten: Während am linken Knoten kein Fahrzeug wartet und die zufließenden freie Fahrt haben, hat es der rechte Knoten schwer, die Warteschlange der Linksabbieger, zu der ständig neue Fahrzeuge hinzukommen, aufzulösen um endlich zur immer länger werdenden Warteschlange am Zufluss umschalten zu können. Unterdessen hält der rechte Knoten jene Fahrzeuge zurück, die dem linken für einen ausreichend hohen mittleren Durchsatz fehlen. Die Situation am linken Knoten beschreiben Kumar u. Seidman (1990) mit den Worten „*being starved of input*.“ Der vorübergehend ausbleibende Zufluss von rechts vermindert vorübergehend die Abfertigungsrate des Knotens. Diesen Effizienzverlust kann die Steuerung später nicht mehr ausgleichen. Die Situation verschlimmert sich von Periode zu Periode.

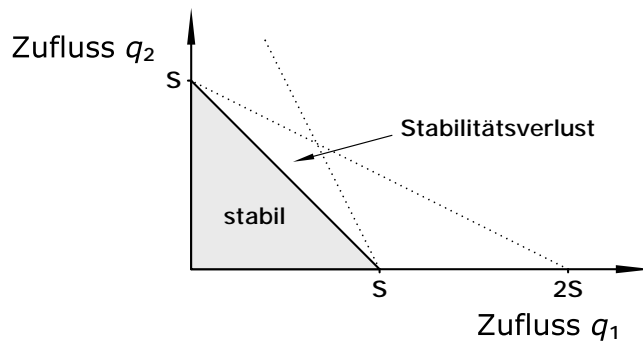


Abbildung 13: Stabilitätsbereich der verkehrsabhängigen Logiksteuerung im Straßennetz aus Abbildung 10. Der Stabilitätsverlust gegenüber einer Festzeitsteuerung ist auf das dynamische Aufschaukeln zurückzuführen.

3.4 Verallgemeinerung

Die wichtigste Erkenntnis, die aus den obigen Betrachtungen gezogen werden kann, ist, dass sich aus dem Verhalten einer verkehrsabhängigen Steuerung am Einzelknoten noch lange nicht auf ihr Verhalten im Netz schließen lässt. In komplexeren Szenarien können sich noch kompliziertere dynamische Phänomene ergeben, wie Lämmer (2007); Lämmer u. Helbing (2008) aufzeigen. Meist entziehen sich diese der analytischen Betrachtung und werden nur in Computersimulationen ersichtlich. Doch es lassen sich zumindest einige allgemeine Beobachtungen festhalten.

Dynamische Rückkopplungen

Die vernetzten Verkehrsströme transportieren (allein durch die Präsenz oder Nicht-Präsenz von Fahrzeugen) Informationen von einem Knoten zum anderen. Das Schaltverhalten eines vollverkehrsabhängig gesteuerten Knotens wirkt auf seine Nachbarn – und über diese entweder direkt oder über weitere Knoten indirekt auf ihn selbst zurück. Jede Schleife im Netz wirkt als eine Rückkopplungsschleife.⁷ Dabei stellt bereits jeder Straßenabschnitt mit zwei Richtungsfahrbahnen, wie das obige Beispiel gezeigt hat, eine Schleife dar. Ist eine Rückkopplung positiv in dem Sinne, dass eine Wirkung ihre Ursache verstärkt, dann ist Instabilität die Folge.

Beschränkte Prognosehorizonte

Aufgrund der dynamischen Rückkopplungen kann das zeitliche Ankunftsprofil der an einem Knotenpunkt zufließenden Fahrzeuge nun nicht mehr als unabhängige Größe betrachtet werden. Die Entwicklung des Verkehrsablaufs hängt vom Geschehen im gesamten

⁷Nach Kumar u. Meyn (1995) ist die oben betrachtete Schaltregel ausschließlich in schleifenfreien (azyklischen) Netzen stabil.

Straßennetzwerk ab. Prognosen über einen bestimmten Zeithorizont hinaus sind fehlerträchtig. Denn während sich relativ sicher abschätzen lässt, wann die bereits auf freier Strecke zufließenden Fahrzeuge die Haltelinie erreichen werden, sind Prognosen über die Fahrzeit zwischen den Knotenpunkten hinaus problematisch. Eine solche Prognose würde Kenntnis des zukünftigen Schaltverhaltens der Nachbarknoten voraussetzen. Aber selbst wenn dieses zugänglich und verlässlich wäre, tritt für Prognosen, die über das Doppelte der Fahrzeit hinausgehen, ein weiteres Problem auf: In solche Prognosen müsste eingehen, wie sich der lokal betrachtete Knoten selbst in Zukunft verhalten wird. Entscheidungen, die auf solchen selbstbezüglichen Prognosen beruhen, können leicht zu „strategischen Instabilitäten“ oder „sozialen Dilemmas“ führen, wie sie beispielsweise Fudenberg u. Tirole (1991) im Kontext der Spieltheorie und Huberman u. Lukose (1997) im Kontext von Multiagenten-Systemen diskutieren. Folglich sind verlässliche Prognosen von Einzelankünften ohne Weiteres nur über das ein- bis höchstens zweifache der Fahrzeit zwischen den Knotenpunkten möglich. Die beschränkte Prognosefähigkeit, auf die das instabile Verhalten der Optimierungsverfahren aus Abschnitt 2 ursächlich zurückzuführen ist, scheint eine natürliche Eigenschaft vollverkehrsabhängig gesteuerter Straßennetze zu sein.

Chaos

Hinzu kommt, dass kleine zufällige Störungen große Auswirkungen haben können. Falls beispielsweise ein Fahrzeug langsamer als angenommen beschleunigt und sich die vollverkehrsabhängige Steuerung darauf einstellt, kann sich der Verkehrsablauf in Folge dessen in eine gänzlich andere Richtung entwickeln. Das wäre ein Anzeichen chaotischen Verhaltens. Chaos ist eine Eigenschaft nichtlinearer dynamischer Systeme und liegt vor, wenn anfänglich nahe beieinander liegende Systemzustände exponentiell auseinanderlaufen.⁸ Zwar setzt Chaos, wie Devaney (2003); Schuster u. Just (2005) betonen, keinerlei Stochastizität voraus. Doch unter stochastischen Bedingungen lässt sich die zeitliche Entwicklung chaotischer Systeme aufgrund ihrer extremen Empfindlichkeit gegenüber kleinsten Störungen schwerlich vorhersagen.

Von Warteschlangen-Systemen ist nicht erst seit Wiggins (2003) bekannt, dass diese unter bestimmten Bedingungen chaotisches Verhalten entwickeln. Wie Chase u. a. (1993); Yu u. Vakili (1996); Peters u. Parlitz (2003); Blank u. Bunimovich (2004) anhand unterschiedlicher Beispiele deutlich machen, kann Chaos sogar an einer einzelnen Bedienstation mit drei Zuflüssen und einfachen Schaltregeln auftreten. Bei Verkehrssystemen kommt noch die Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen hinzu, welche, wie Safonov u. a. (2002) zeigen, ebenfalls chaotisch sein kann. Und Toledo u. a. (2004); Nagatani (2005) betrachten

⁸Chaotische Systeme werden häufig mit dem „Schmetterlingseffekt“ in Verbindung gebracht. Diese Bezeichnung geht auf Lorenz (1963) zurück, der die Frage stellt: „Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?“

sogar nur ein einziges Fahrzeug: Selbst dessen Trajektorie ist chaotisch, wenn es eine Serie festzeitgesteuerter Knotenpunkte zu passieren hat. So scheint auch Chaos eine natürliche Eigenschaft von Verkehrsflusssystemen zu sein.

Konsequenzen

Der Ansatz, mit Lichtsignalsteuerungen flexibel auf lokale Gegebenheiten zu reagieren und so zur Optimierung des Verkehrsablaufs beizutragen, hat zur Folge, dass die dynamische Komplexität des Straßennetzes deutlich zunimmt. Für ein Straßennetz realistischer Größe ist die analytische Prüfung aller möglichen Ursachen dynamischer Instabilitäten aussichtslos (unter Beachtung der vorhandenen Nichtlinearitäten und Zeitversätze und selbst unter Annahme deterministischer Zuflüsse). Ebenso ist es aussichtslos, für jeden empirisch gefundenen Fall instabilen Verhaltens eine Gegenmaßnahme zu erarbeiten und in der Steuerung separat zu hinterlegen. Um stabiles Verhalten sicher zu stellen bedarf es anderer Ansätze.

Es kommt darauf an, die lokalen Steuerungen mit geeigneten Mechanismen auszustatten, welche die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems trotz Verkehrsabhängigkeit aufrecht erhalten. Denn solange sich für die gegebene Verkehrsnachfrage ein stabiles Festzeitprogramm finden lässt, muss es auch mit einer anderen, verkehrsabhängigen Steuerung möglich sein, jedem Strom hinreichend häufig und bei Bedarf hinreichend lange Grün zu geben. Und es muss möglich sein, die nicht unbedingt benötigten Kapazitäten als Spielraum für lokale Optimierungen nutzbar zu machen. Wie das gelingen kann, wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

4 Stabilisierung

Ein vollverkehrsabhängig gesteuertes Straßennetz lässt sich stabilisieren, wenn an jedem seiner Knotenpunkte entscheidende Prinzipien beachtet werden. Im Folgenden werden Regeln hergeleitet, die sicherstellen, dass jeder Verkehrsstrom hinreichend häufig und bei Bedarf hinreichend lange Grün bekommt. Bei der Spezifikation des Stabilisierungsmechanismus werden sich gewisse Freiheitsgrade ergeben, die sich zur Erfüllung sicherheitsrelevanter Anforderungen, aber auch zur Umsetzung stadt- und verkehrsplanerischer Zielsetzungen nutzen lassen. Selbst bei Übersättigung, wenn das Anwachsen der Warteschlangen nicht aufzuhalten ist, wird sich ein sicherer und geregelter Betrieb einstellen. Die Ergebnisse werden abschließend anhand von Simulationsbeispielen dargelegt und diskutiert.

4.1 Ansatz

Vorbild Festzeitsteuerung

Der einfachste Weg, ein nicht übersättigtes Straßennetz beliebiger Größe zu stabilisieren, ist, jeden einzelnen seiner Knotenpunkte mit einer stabilen Festzeitsteuerung zu betreiben. Ob dabei Koordinierungen zustande kommen oder nicht, spielt für die Stabilisierung keine Rolle. Unter der Voraussetzung, dass die periodisch wiederkehrenden Rückstaus vorgelagerte Knotenpunkte nicht blockieren, sind allein die Umlaufzeit und die Grünzeiten stabilitätsbestimmend. Für deren Bemessung sind die Verkehrsstärken der Zuflüsse entscheidend. Diese lassen sich entweder lokal erheben oder mit fortgeschrittenen Methoden schätzen. Vielversprechende Ansätze stellen u.a. von de Ruhren (2006); Seydel (2008); Mück (2008) vor. Letztlich kann das Problem der Netzstabilisierung auf die Bestimmung mehrerer unabhängiger Festzeitprogramme reduziert werden.

Bei einem nach HBS (2005) bemessenen Festzeitprogramm können innerhalb einer Grünzeit mehr Fahrzeuge abfließen, als innerhalb der Umlaufzeit im Mittel neu hinzukommen. Wie groß die bei Grün abfließende Fahrzeugkolonne aber tatsächlich ist, hängt von der Zufälligkeit im Ankunftsprozess ab. Bei vollständiger Warteschlangenleerung werden es immer genau so viele Fahrzeuge sein, wie seit dem Ende der letzten Grünzeit zugeflossen sind. Das sind einmal mehr und einmal weniger, als aufgrund der Verkehrsstärke im Mittel zu erwarten sind. Zufällige Schwankungen im Zufluss wirken sich unmittelbar auf die Größe der bei Grün abfließenden Fahrzeugkolonnen aus. Die Grünzeiten für einen Verkehrsstrom sind zwar identisch in Länge und Folgezeit, doch sie werden unterschiedlich effizient genutzt.

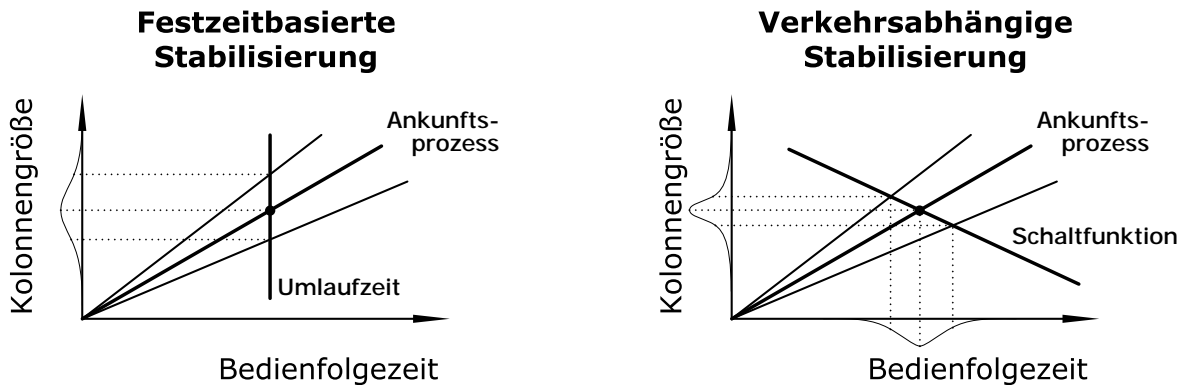


Abbildung 14: Qualitative Gegenüberstellung zweier Kriterien, nach denen ein Verkehrsstrom zur Bedienung ausgewählt wird. Die mittlere der im Ursprung beginnenden Linien gibt an, wie viele Fahrzeuge eines Verkehrsstroms bei Grün im Mittel abfließen werden (Kolonnengröße), wenn seit dem letzten Bedienvorgang eine bestimmte Zeit (Bedienfolgezeit) verstrichen ist. Zufälligkeiten im Ankunftsprozess führen zu Abweichungen. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegen sie innerhalb der beiden äußeren Linien. Links: Mit einer Festzeitsteuerung ist die Bedienfolgezeit immer die Gleiche (Umlaufzeit). Zuflussschwankungen bewirken eine Streuung der Kolonnengröße. Rechts: Mit der verkehrsabhängigen Stabilisierung werden im Mittel genauso viele Fahrzeuge genauso häufig abgefertigt (dicker Punkt). Allerdings beginnt die Bedienung eines Verkehrsstroms erst, wenn sich nach einer gewissen Zeit eine kritische Zahl an Fahrzeugen angefundenes hat (Schaltfunktion). Zuflussschwankungen wirken sich in variablen Bedienfolgezeiten aus und weniger in der Streuung der Kolonnengröße. Dadurch können Grünzeiten effizienter genutzt und häufig verkürzt werden können.

Verkehrsabhängige Stabilisierung

Der nachfolgend vorgestellte Mechanismus zur verkehrsabhängigen Stabilisierung geht davon aus, dass für die aktuelle Verkehrsnachfrage die Umlaufzeit und die Grünzeiten eines stabilen Festzeitprogramms bekannt sind. Allerdings wird das Wirkungsprinzip verkehrsabhängig ausgenutzt: Es wird nicht nur gewartet, bis es Zeit ist einen Verkehrsstrom zu bedienen, sondern auch, bis eine bestimmte Zahl an Fahrzeugen zur Abfertigung bereit ist. Die kritische Kolonnengröße kann dabei so gewählt werden, dass sie der Anzahl der Fahrzeuge entspricht, die innerhalb einer gewählten Zeitspanne (der stabilen Umlaufzeit) im Mittel zufließen. Diese kommt abhängig vom Ankunftsprozess einmal früher und einmal später zustande, aber im Mittel einmal innerhalb dieser Zeitspanne. Ein so geregelter Knoten hat dieselbe Durchlassfähigkeit, d.h. er wird dieselben Verkehrsstärken aus jeder Richtung abfertigen können, wie mit dem zugrunde liegenden Festzeitprogramm. Abbildung 14 (rechts) stellt die unterschiedlichen Ansätze qualitativ gegenüber. Zu beachten ist die Schaltfunktion. Ihr Überschreiten dient als Indikator kritischer Zustände und soll die Bedienung der kritisch gewordenen Verkehrsströme auslösen. Durch die Wahl der Schaltfunktion lässt sich eine Balance zwischen Verkehrs- und Zeitabhängigkeit einstellen und

eine maximale Bedienfolgezeit vorgeben. Auf die Spezifikation der Schaltfunktion wird im Abschnitt 4.3 genauer eingegangen.

Bedienkonzept

Dieses bedarfsgetriebene Bedienkonzept ist aus verschiedenen Gründen interessant. Zum einen stellt es sicher, dass in jeder Grünzeit eine (von der Bedienfolgezeit abhängige) Mindestzahl an Fahrzeugen mit maximaler Rate abfließt. Damit werden die Grünzeiten effizienter genutzt. Hinsichtlich der Stabilisierung reicht es sogar aus, die Grünzeit bereits nach Leerung der Warteschlange abubrechen. Die Grünzeiten werden verkürzt. Die zur Stabilisierung nicht unbedingt benötigten Grünzeiten werden frei.

Zum anderen werden mit variablen Bedienfolgezeiten Zuflussschwankungen ausgeglichen. In vollverkehrsabhängig gesteuerten Straßennetzen zeichnen sich die Zuflüsse durch unterschiedlich große Kolonnen mit stark schwankenden Ankunftszeitpunkten aus. Zyklische Ankunftsprofile gibt es nicht. Da ist es zweckmäßig, falls ein Teil der zufließenden Fahrzeuge später eintrifft, eine bestimmte Zeit lang auf diesen zu warten. Es sind mit höherer Wahrscheinlichkeit die größeren Kolonnen, die das Überschreiten der kritischen Fahrzeugzahl und damit das Umschalten auf Grün auslösen. Variable Bedienfolgezeiten begünstigen so die Kolonnenführung durch ein Straßennetz, das durch Irregularität und Unvorhersehbarkeit geprägt ist.

Der Hauptgrund aber, warum dieses ungewöhnliche Bedienkonzept überhaupt in Erwägung gezogen wird, ist folgender: Da vor dem Grünschalten auf eine kritische Fahrzeugzahl gewartet wird, beginnen die Grünzeiten erst dann und nicht früher, als es zur Stabilisierung und zum Einhalten gewünschter bzw. maximaler Bedienfolgezeiten unbedingt notwendig ist. Damit eignet es sich zur Überwachung einer anderen – der eigentlichen – Knotensteuerung. Dieser sei es überlassen, die Grünzeiten früher zu beginnen und die Fahrzeuge früher abzufertigen. Doch falls ihr das aus verschiedenen Gründen nicht gelingen sollte, dann wird dies von der lokalen Zustandsüberwachung sofort erkannt. Mit der Vorgabe, die kritisch gewordenen Verkehrsströme unverzüglich zu bedienen, wird der Verkehrsknoten stabilisiert. Das gesamte Netz ist stabil, wenn jeder Knoten über eine solche Zustandsüberwachung verfügt.

4.2 Zustandsüberwachung

Aufbau

Als ein Konzept zur Regelung nichtlinearer dynamischer Systeme wird die Zustandsüberwachung (engl. *supervisory control*) häufig zur Stabilisierung von Warteschlangen in Produktions- und Materialfluss-Netzwerken eingesetzt. Ihre Aufgabe ist es, kritische

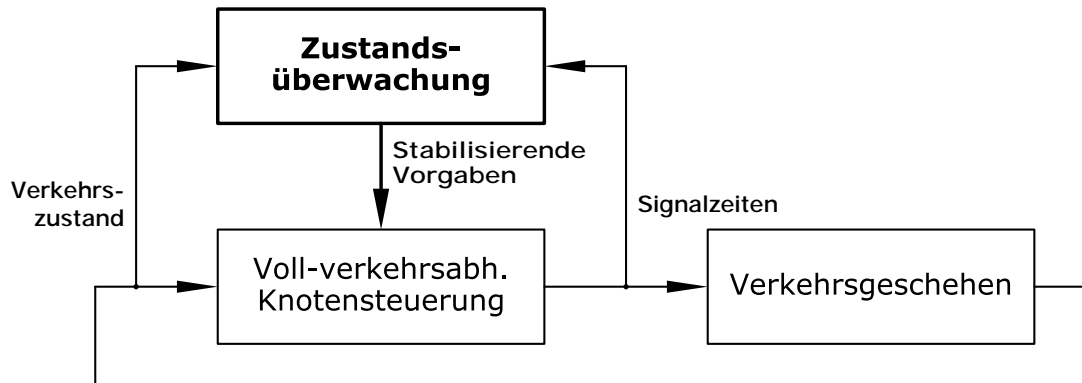


Abbildung 15: Die lokale Zustandsüberwachung verfolgt den Verkehrsablauf und identifiziert (anhand des Mechanismus aus Abbildung 14 rechts) kritische Zustände. Durch Vorgaben an die Knotensteuerung, beispielsweise einen kritischen Verkehrsstrom unverzüglich zu bedienen, werden maximale Bedienfolgezeiten eingehalten und der Verkehrsablauf stabilisiert. Solange die Knotensteuerung von selbst das gewünschte Verhalten zeigt, braucht die Überwachung nicht einzugreifen.

Systemzustände rechtzeitig zu erkennen und Maßnahmen vorzugeben, die das System schnellstmöglich wieder in einen unkritischen Zustand überführen.

Die Zustandsüberwachung kann als ein eigenständiger Prozess verstanden werden, der beispielsweise neben dem Regelalgorithmus der verwendeten vollverkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung auf dem selben Steuergerät läuft. Wie in Abbildung 15 schematisch dargestellt, verfolgt dieser Prozess die Entwicklung des Verkehrsgeschehens und die von der Knotensteuerung vergebenen Grünzeiten. Daraus kann abgeleitet werden, ob oder wann ein bestimmter Verkehrsstrom als kritisch einzustufen ist.

Funktionsweise

Sobald ein Verkehrsstrom als kritisch identifiziert wurde, ist dieser zum nächstmöglichen Zeitpunkt zu bedienen.⁹ Der Verkehrsstrom verliert seinen kritischen Zustand, wenn entweder die zugehörige Grünzeit eines stabilen Festzeitprogramms erreicht oder die Warteschlange vorher geleert wurde. Er kann erst in der nachfolgenden Rotzeit wieder kritisch werden. Befinden sich mehrere zueinander unverträgliche Ströme gleichzeitig im kritischen Zustand, so sind sie in der Reihenfolge zu bedienen, in der sie kritisch geworden sind. Auf diese Weise schreitet der Stabilisierungsmechanismus in kritischen Fällen kurzzeitig und wirkungsvoll ein, während er sich sonst aus der Organisation des Verkehrsablaufs zurückhält.

Solange die lokale Steuerung jeden Verkehrsstrom hinreichend häufig bedient, wird sich

⁹Dass bis zum Umschalten auf Grün Zwischenzeiten einzuhalten sind, wird vom Kriterium zur Identifikation kritischer Zustände explizit berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.3).

der Überwachungsmechanismus passiv verhalten und das Steuerungsverfahren in keiner Weise beeinflussen. Anderenfalls, wenn die lokale Steuerung beispielsweise zu viel Zeit für die Abfertigung der Hauptströme aufbringt oder Bussen und Straßenbahnen zu häufig Vorrang gewährt, wird der Mechanismus in regelmäßigen Abständen die Abfertigung der vernachlässigten Nebenströme anordnen. Wie die kritischen Ströme eingebunden werden, ob durch Phasentausch oder Auswahl geeignet zusammengestellter Signalgruppenkombinationen, sei dem lokalen Steuerungsverfahren überlassen.

Implementierungs-Strategien

Je nach Implementierungs-Strategie kann das Steuerungsverfahren in unterschiedlicher Weise auf die stabilisierenden Vorgaben der Zustandsüberwachung eingehen. Im einfachsten Fall reagiert die Steuerung erst dann auf die Vorgaben, nachdem sich ein kritischer Zustand eingestellt hat. So wird dem Steuerungsverfahren bei drohendem Stabilitätsverlust vorübergehend die Kontrolle entrissen. Sobald die Verkehrssituation in einen unkritischen Zustand überführt wurde, beispielsweise nach erzwungener Abfertigung einer Wartekolonne, kann sie mit ihrer Regelungsstrategie fortfahren. Zwar kann dieses Vorgehen eventuelle Optimierungsansätze zunichte machen, aber es garantiert Stabilität für jedes beliebige Steuerungsverfahren. Insbesondere solche Verfahren, die zwar keinem universellen Stabilitätsbeweis standhalten, sich aber dennoch in den meisten Fällen hervorragend verhalten, können somit sicher eingesetzt werden. Die Ergebnisse in Lämmer (2007); Lämmer u. Helbing (2008); Lämmer u. a. (2009) basieren auf dieser Strategie.

Eleganter ist es, wenn die Steuerung kritische Zustände aktiv und vorausschauend zu vermeiden versucht. Dafür ist es notwendig, das Eintreten kritischer Zustände bereits bei der Bewertung zukünftiger Schaltfolgen zu berücksichtigen, beispielsweise durch Strafterme in der Zielfunktion eines prognosebasierten Verfahrens. Ebenso ist es denkbar, daraus Randbedingungen für ein Optimierungsverfahren abzuleiten, innerhalb derer ausschließlich stabile Lösungen entstehen. Auf diese Weise kann die Knotensteuerung die Vorgaben der Zustandsüberwachung rechtzeitig in den Signalzeitenplan einbauen. Beispielsweise kann die Leerung eines beinahe kritischen Nebenstroms vorgezogen werden, um die nachfolgend im Hauptstrom eintreffende Fahrzeugkolonne nicht aufhalten zu müssen. Es ergibt sich ein Zusammenspiel aus Optimierung und Stabilisierung.

4.3 Spezifikation

Nun soll das Kriterium spezifiziert werden, nach welchem ein Verkehrsstrom zum aktuellen Zeitpunkt zur Bedienung auszuwählen ist. Ausgangspunkt ist ein Verkehrsknoten, für den die mittleren Verkehrsstärken der zufließenden Ströme sowie Umlaufzeit und Grünzeiten

eines stabilen Festzeitprogramms bekannt sind. An die Häufigkeit der Bedienvorgänge werden dabei zwei Anforderungen gestellt:

- Im Sinne der Stabilisierung soll jeder Verkehrsstrom im Mittel einmal innerhalb einer Wunschperiode T bedient werden.
- Im Sinne der Verkehrssicherheit muss jeder Verkehrsstrom mindestens einmal innerhalb einer wählbaren Maximalperiode T^{\max} bedient werden. Dies muss selbst dann gelten, wenn kein Zufluss detektiert wurde.

Weil das Kriterium noch während der Rotzeit über die nachfolgenden Grünzeit entscheiden muss, weisen die zugrunde liegenden Zustandsgrößen einige Besonderheiten auf.

Bedienfolgezeit und Kolonnengröße

Wie bereits in Abbildung 14 im Ansatz erläutert, basiert das Kriterium auf der Auswertung zweier Zustandsgrößen: der Bedienfolgezeit und der Kolonnengröße. Beide Größen beziehen sich auf den frühestmöglichen Zeitpunkt, zu dem die Warteschlange eines Verkehrsstroms das nächste Mal vollständig geleert sein kann. Die Zeit, die vom Ende der letzten Grünzeit bis dahin verstreicht, wird als Bedienfolgezeit \hat{z} bezeichnet. Die Kolonnengröße \hat{n} steht für die Anzahl der Fahrzeuge, die während der Leerung mit maximaler Rate abfließen. Für beide Größen wird berücksichtigt, dass die nächste Grünzeit erst nach Ablauf der erforderlichen Zwischenzeit beginnen kann, und dass jedes Fahrzeug, das beim Umschalten oder beim Leeren hinzukommt, den Leerungsprozess zusätzlich verlängert. Dass es sich deshalb um Schätzgrößen handelt, wird durch das Dach symbolisiert. Wie \hat{z} und \hat{n} unter diesen Vorgaben aus den Zeitreihen von Zu- und Abflussdetektoren modellbasiert prognostiziert werden können, wird von Lämmer (2007); Lämmer u. a. (2007) quantitativ hergeleitet und erläutert. Der Prognosehorizont sollte dabei so groß sein wie die Summe aus Zwischen- und nachfolgender Grünzeit.

Die Kolonnengröße \hat{n} hat die interessante Eigenschaft, dass sie sich nicht nur auf die aktuell wartenden Fahrzeuge bezieht, sondern auch auf die, die sich noch auf freier Strecke befinden und erst im Leerungsprozess eintreffen werden. Beispielsweise wird \hat{n} durch eine herannahende Fahrzeugkolonne sprunghaft größer, weil in der nachfolgenden Grünzeit plötzlich mehr Fahrzeuge mit maximaler Rate abfließen können. Falls dieser Sprung von \hat{n} das Umschalten auslöst, ist der Umschaltvorgang und die Abfertigung der wartenden und der noch ankommenden Fahrzeuge genau dann abgeschlossen, wenn die betrachtete Kolonne die Haltelinie erreicht.

Die Bedienfolgezeit \hat{z} ist keine rein zeitliche, sondern auch eine verkehrsabhängige Größe. Sie setzt sich sowohl aus der zurückliegenden Rot- und der noch ausstehenden Zwischenzeit zusammen, als auch aus dem Zeitbedarf zum Leeren der Warteschlange. Bei

größeren Verkehrsstärken wird die gleiche Bedienfolgezeit beispielsweise schon nach kürzerer Rotzeit erreicht.

Für den Zusammenhang zwischen den beiden Zustandsgrößen gilt: Bei vollständiger Warteschlangenleerung, von der zunächst ausgegangen wird, ist die bei Grün abfließende Kolonne \hat{n} immer so groß wie die Zahl der innerhalb der Bedienfolgezeit \hat{z} zufließenden Fahrzeuge. Im deterministischen Fall mit konstanter Zuflussrate q gilt folglich $\hat{n} = q\hat{z}$. Für den allgemeinen Fall mit stochastischen Einzelankünften können lediglich Wahrscheinlichkeiten angegeben werden: Dass innerhalb einer Bedienfolgezeit \hat{z} mehr als \hat{n} Fahrzeuge abgefertigt werden können, ist genauso wahrscheinlich wie der Fall, dass im gleichen Zeitraum mehr als \hat{n} Fahrzeuge zufließen. Aus diesen Überlegungen heraus kann nun die Schaltfunktion spezifiziert werden.

Schaltfunktion

Die Zustandsüberwachung soll einen Verkehrsstrom als kritisch einstufen und dessen Bedienung anordnen, wenn die in der nachfolgenden Grünzeit abfließende Fahrzeugkolonne \hat{n} einen Schwellenwert $c(\hat{z})$ erreicht oder überschreitet. Letzter übernimmt aufgrund seiner Abhängigkeit von der Bedienfolgezeit \hat{z} die Rolle einer Schaltfunktion. Das Kriterium lautet in allgemeiner Form

$$\hat{n} \geq c(\hat{z}). \quad (18)$$

Um die eingangs aufgeführten Anforderungen zu erfüllen, muss die Schaltfunktion $c(\hat{z})$ drei Eigenschaften aufweisen. Eine zulässige Realisierung, die alle drei Eigenschaften hat, zeigt Abbildung 16.

Zu erst muss die Schaltfunktion streng monoton fallend sein, d.h.

$$dc/d\hat{z} < 0. \quad (19)$$

Dies stellt sicher, dass jeder Verkehrsstrom mit fortschreitender Rotzeit irgendwann kritisch werden muss und er diesen Status erst durch seine Bedienung wieder verlieren kann. Dem liegt zugrunde, dass \hat{n} und \hat{z} während der Rotzeit lediglich größer aber niemals kleiner werden können.

Zum Zweiten muss die Schaltfunktion, damit sich im stabilitätskritischen Fall im Mittel die Wunschperiode T einstellt, die Eigenschaft

$$c(T) = qT \quad (20)$$

haben. Denn die Bedienung soll starten, sobald innerhalb der Bedienfolgezeit $\hat{z} = T$ genau so viele Fahrzeuge abgefertigt werden können, wie bei gegebener Verkehrsstärke q inner-

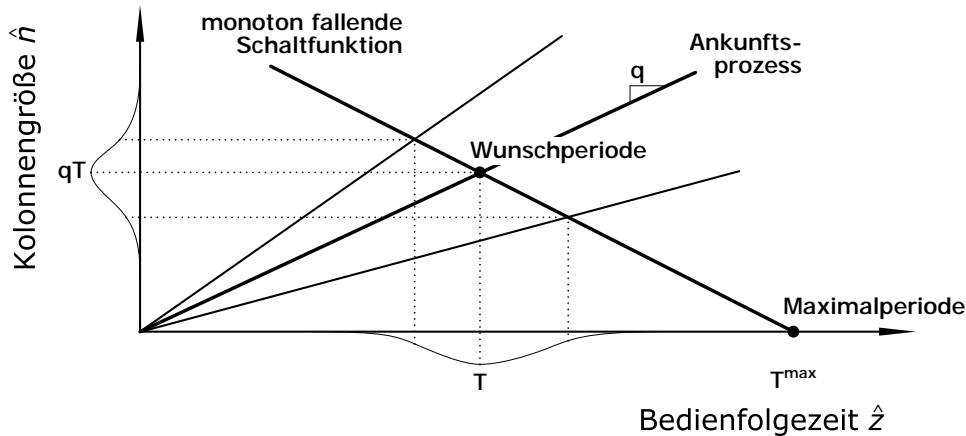


Abbildung 16: Beispiel einer zulässigen Schaltfunktion. Sie ist streng monoton fallend und verläuft durch die beiden in den Gleichungen (20) und (21) spezifizierten Punkte. Durch Wahl der Wunschperiode T und der Maximalperiode T^{\max} kann das dynamische Verhalten des Stabilisierungsmechanismus innerhalb bestimmter Grenzen variiert werden.

halb der Wunschperiode T im Mittel zufließen. Falls diese kritische Kolonnengröße bis dahin nicht zustande kommt, soll noch eine gewisse Zeit gewartet (und damit der verwendeten Knotensteuerung der Vorzug gelassen) werden. Wenn anderenfalls mehr Fahrzeuge schon früher bereit sind, sollen diese auch früher abgefertigt werden. Wie Abbildung 16 zeigt, werden deshalb Bedienfolgezeit \hat{z} und Kolonnengröße \hat{n} um den Punkt (T, qT) streuen.

Die Maximalperiode T^{\max} wird niemals überschritten, wenn die Schaltfunktion die dritte Bedingung

$$c(T^{\max}) = 0 \quad (21)$$

erfüllt. Selbst wenn innerhalb einer Bedienfolgezeit $\hat{z} = T^{\max}$ kein Fahrzeug abzufertigen ist, d.h. im Falle $\hat{n} = 0$, wird ein Bedienvorgang ausgelöst. Bei der Implementierung ist darauf zu achten, dass eine sicherheitskritische Bedienung mit $\hat{z} = T^{\max}$ Vorrang vor der Abfertigung anderer kritischer Ströme haben muss. Damit ist selbst bei Detektorausfällen sicher gestellt, dass jeder Verkehrsstrom mindestens einmal in T^{\max} Sekunden Grün bekommt.

4.4 Freiheitsgrade

Diese Spezifikation lässt Freiheitsgrade zu, innerhalb derer beispielsweise das Maß der Verkehrsabhängigkeit und der Spielraum der verwendeten Knotensteuerung variiert werden kann.

Wunschperiode

Mit Wahl der Wunschperiode T kann auf die Fälle Einfluss genommen werden, in denen die verwendete Knotensteuerung aufgrund von Zuflussschwankungen, der vermehrten Ankunft hoch priorisierter ÖV-Fahrzeuge oder stabilitätskritischen Fehlentscheidungen nicht mehr von sich heraus wie gewünscht verhält. In solchen Fällen wird die lokale Zustandsüberwachung jeden Verkehrsstrom im Mittel einmal innerhalb der Wunschperiode T hinreichend lange zur Bedienung auswählen. Die Wunschperiode T muss der Umlaufzeit eines stabilen Festzeitprogramms entsprechen und folglich größer sein als die theoretische Mindestumlaufzeit. Da die Mindestumlaufzeit meist von der Phasenfolge abhängt, ist bei ihrer Bestimmung darauf zu achten, dass sie auch im ungünstigen Fall groß genug ist. Die Differenz zwischen Mindestumlaufzeit und gewählter Wunschperiode T verbleibt der verwendeten Knotensteuerung als Spielraum, den sie für zusätzliche Umschaltvorgänge oder Grünzeitverlängerungen nutzen kann, ohne dass die Zustandsüberwachung einschreitet. Es ist somit ausreichend, die Wunschperiode T an den Spitzenstunden auszurichten und im übrigen Tagesverlauf beizubehalten. Zu empfehlen sind relativ hohe, aber aus Sicht der Verkehrsteilnehmer noch akzeptable Werte, beispielsweise $T = 90$ s. Die verwendete Knotensteuerung wird – wenn sie kann – geringere Folgezeiten einrichten.

Maximalperiode

Mit der Maximalperiode T^{\max} werden ernste Störfälle, wie der Ausfall von Detektoren, abgefangen.¹⁰ Falls die verwendete Knotensteuerung einen ausbleibenden oder nicht detektierten Zustrom nicht von selbst regelmäßig mit Grünzeiten versorgt, weil es beispielsweise nicht optimal scheint oder weil die Steuerungslogik Leerläufe vermeidet, geschieht dies durch die Zustandsüberwachung innerhalb der Maximalperiode T^{\max} ein Mal. Die Maximalperiode T^{\max} muss größer sein als die Wunschperiode T . Je näher beide beieinander liegen, desto mehr ähnelt die Schaltfunktion der einer Festzeitsteuerung (vgl. Abbildungen 14 und 16). Umgekehrt gewinnt die Zustandsüberwachung mit größerem T^{\max} und einer flacheren Schaltfunktion ein höheres Maß an Verkehrsabhängigkeit. Zu empfehlen sind größtmögliche, mit den Richtlinien RiL (1992); HBS (2005) verträgliche Werte, beispielsweise $T^{\max} = 120$ s.

Grünzeiten

Die Grünzeiten des zugrunde liegenden Festzeitprogramms bestimmen die Kapazität eines Knotens im Falle von Verkehrsspitzen oder Übersättigung. Denn wenn jeder Verkehrs-

¹⁰Ist das Fehlverhalten bestimmter Detektoren bekannt, empfiehlt Lämmer (2007), diese besser durch virtuelle Detektoren zu ersetzen. Bei bekannter Verkehrsstärke würden virtuellen Ströme innerhalb der Wunschperiode T hinreichend lange Grün bekommen.

strom nur genau ein Mal innerhalb der Wunschperiode T bedient werden kann, kommen diese Grünzeiten zur Anwendung. Das HBS (2005) empfiehlt, die Grünzeiten proportional zur Auslastung der Verkehrsströme aufzuteilen. Es gibt aber noch andere Möglichkeiten.

Im Hinblick auf Übersättigung ist es sinnvoll, von der proportionalen Aufteilung abzuweichen und einigen ausgewählten Strömen längere Grünzeiten zuzuweisen. Welche Ströme zu bevorzugen sind, kann sich aus stadtplanerischen Überlegungen ergeben. So fordern beispielsweise Kirchhoff (2002); Steierwald u. a. (2005), den Verkehr im Hauptstraßennetz zu bündeln um Nebenstraßen und Wohngebiete zu entlasten. Dieses Ziel, auch „*Stadtfahrplan*“ genannt, lässt sich durch gezielte Kapazitätszuweisung auch mit vollverkehrsabhängigen Steuerungen umsetzen: Die Zustandsüberwachung garantiert den Hauptströmen, die für den netzweiten Verkehr wichtig sind, an den Knoten eine größere Kapazität, während sie gleichzeitig den Zufluss aus dem Nebestreckennetz drosselt.

Statt die zugesicherten Grünzeiten über längere Zeiträume gleich zu halten, können diese ebenso aus der aktuellen Verkehrslage heraus bestimmt werden. Ein von Lämmer (2007); Lämmer u. Helbing (2008) vorgeschlagener Ansatz ist, die Bestimmung der Grünzeitaufteilung auf ein lineares Optimierungsproblem bezüglich der Gesamtwarezeiten zurückzuführen. Einen anderen, nichtlinearen Optimierungsansatz schlägt Gazis (1964, 2002) vor: Er wendet Pontryagins Maximumprinzip an und charakterisiert die optimale Lösung als eine Bang-Bang-Lösung. Allerdings setzt Gazis schwer realisierbare Prognosehorizonte von mehreren Minuten voraus.

4.5 Ergebnisse

Die Zustandsüberwachung wird, je nach Situation und verwendeter Knotensteuerung, auf unterschiedliche Weise zur Stabilisierung des Verkehrsablaufs beitragen. Die Bandbreite der zu erwartenden Ergebnisse wird im Folgenden beispielhaft dargelegt und mit Simulationen veranschaulicht.

Zusammenspiel von Optimierung und Stabilisierung

Der Stabilisierungsmechanismus greift gelegentlich in die Knotensteuerung ein, um einerseits Rückstaulängen zu begrenzen und andererseits gewünschte bzw. maximale Bedienfolgezeiten einzuhalten. Das geschieht insbesondere in solchen Situationen, in denen die Knotensteuerung nicht von selbst das gewünschte Verhalten hervorbringt. Die dynamische Priorisierung aus Abschnitt 2.3, beispielsweise, versagt bei starken Verkehrslasten. Wie Abbildung 17 zeigt, divergieren die Warteschlangen mit diesem Optimierungsverfahren ohne Zustandsüberwachung bereits bei Auslastungen um 75%. Mit der Zustandsüberwachung jedoch, die für bestimmte Verkehrsströme gelegentlich Grünzeiten erzwingt – selbst

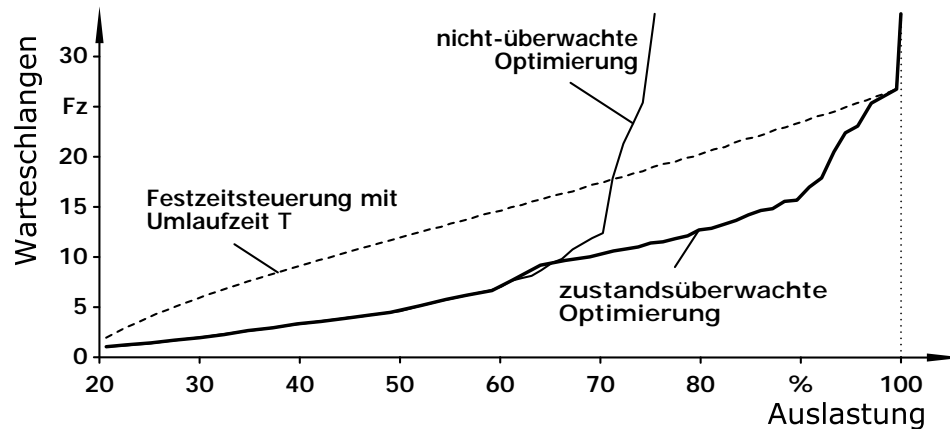


Abbildung 17: Summe der mittleren Warteschlangenlängen an einem vierarmigen Knoten mit konstanten Zuflüssen für verschiedene Auslastungen, aus Lämmer (2007). Das lokale Optimierungsverfahren beruht auf der dynamischen Priorisierung aus Abschnitt 2.3 und wird bereits bei Auslastungen um 75% instabil. In Kombination mit dem Stabilisierungsmechanismus, der Rückstaulängen begrenzt und gewünschte bzw. maximale Bedienfolgezeiten einhält, divergieren die Warteschlangen jedoch erst bei maximaler Auslastung. Die Umlaufzeit der Festzeitsteuerung entspricht der Wunschperiode T und die Aufteilung der Grünzeiten erfolgt proportional zur Auslastung der Verkehrsströme.

wenn es im Sinne des verwendeten Optimierungsverfahrens nicht immer lohnend scheint – bleiben die Warteschlangen auch bei großen Verkehrsstärken beschränkt. Solange es einer Festzeitsteuerung gelingt, die zufließenden Verkehrsströme abzufertigen, solange ist die zustandsüberwachte Optimierung stabil.

Beschleunigte Stauauflösung

Aufgrund von Verkehrsschwankungen sind Überlastungssituationen nicht auszuschließen. In solchen Fällen werden Verkehrsströme genau ein Mal innerhalb der Wunschperiode T mit der Grünzeit eines wählbaren Festzeitprogramms bedient. Mit der Aufteilung der Grünzeiten kann die Durchlassfähigkeit übersättigter Knoten gezielt beeinflusst werden. Ausgewählten Strömen überproportional große Grünzeiten zuzusichern, beschleunigt die Stauauflösung im Hauptstraßennetz und erhöht dessen Durchlässigkeit. Gleichzeitig bekommen Nebenströme nur die zur Stabilisierung minimal erforderlichen Grünzeiten zugewiesen. Auf diese Weise lassen sich mit vollverkehrsabhängigen Steuerungen stadtplanerische Zielsetzungen verwirklichen. Das Prinzip der beschleunigten Stauauflösung verdeutlicht Abbildung 18.

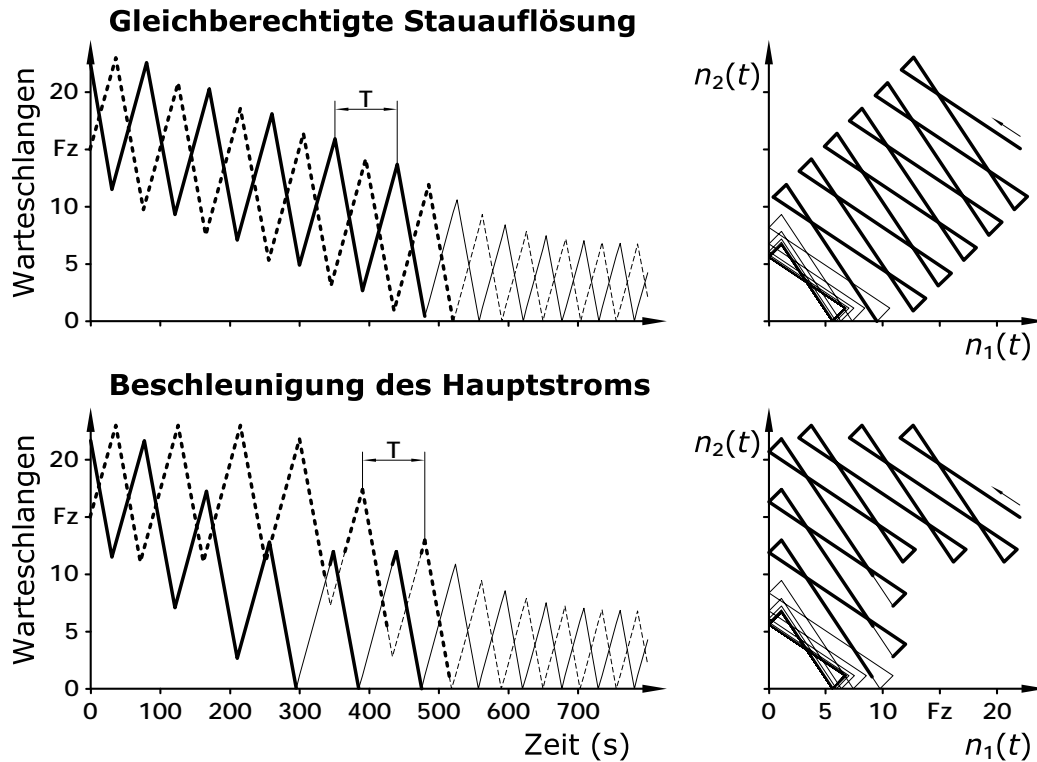


Abbildung 18: Zeitlicher Wartschlangenverlauf (links) und zugehörige Trajektorie (rechts) am Beispiel einer zustandsüberwachten Stauauflösung am zweiarmigen Einzelknoten aus Abschnitt 2.1. Die anfänglich kritischen Warteschlangen (dicke Linien) werden in den optimalen Grenzyklus mit minimalen Gesamtwarezeiten (vgl. Abbildung 9) überführt. Die Zustandsüberwachung teilt die Grünzeiten unterschiedlich auf. Oben: Haupt- und Nebenstraße bekommen gleiche Grünzeiten zugesichert. Das Auflösen beider Warteschlangen dauert gleich lange. Unten: Die Hauptstraße bekommt die maximal verfügbaren Grünzeiten zugewiesen, die Nebenstraße nur die minimal erforderlichen. Der Rückstau auf der Nebenstraße wird erst dann abgebaut, nachdem sich die Situation auf der Hauptstraße entspannt hat. Verwendete Parameter: $T = 90$ s, $T^{\max} = 120$ s, $S_1 = S_2 = 1$ Fz/1,8 s, $q_1 = q_2 = 0,4$ Fz/1,8 s und Zwischenzeit 5 s.

Komplexer Einzelknoten

Das vorgestellte Konzept eignet sich zur Stabilisierung beliebiger vollverkehrsabhängiger Steuerungsverfahren, beispielsweise auch des dynamischen Priorisierungsverfahrens aus Abschnitt 2.3. Weil dessen Optimierungsansatz weder an Phasenfolgen noch Umlaufzeiten gebunden ist, zeichnet es sich durch ein besonders flexibles und bedarfsgerechtes Bedienkonzept aus. Allerdings kann das Priorisierungsverfahren von sich heraus keine maximalen Rotzeiten und erst recht keine Stabilität garantieren. Jedoch nutzt es in Kombination mit der Zustandsüberwachung verfügbare Kapazitätsreserven für zusätzliche Phasenwechsel und Grünzeitverlängerungen. Wie Lämmer (2007); Lämmer u. a. (2009) anhand mehrerer Beispiele zeigen, können an komplexeren Einzelknoten sehr interessante Verhaltensmuster

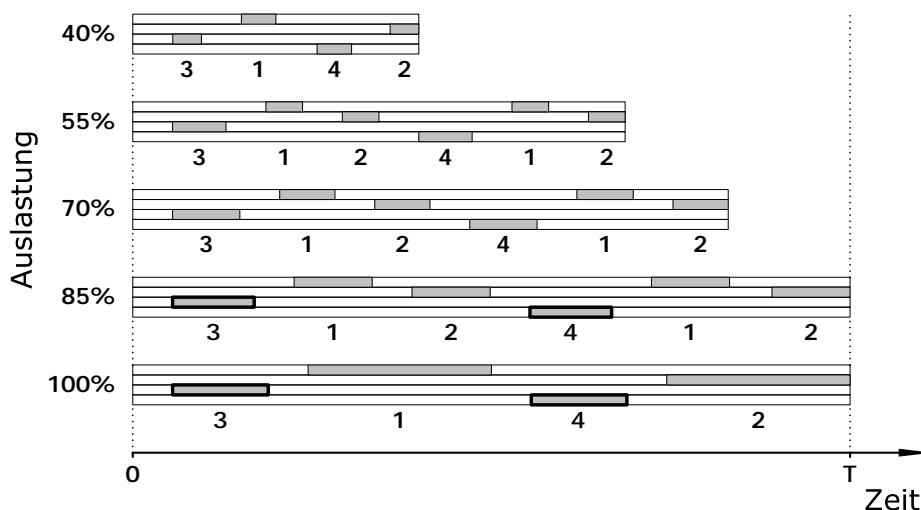


Abbildung 19: Grünzeiten der vier Phasen eines komplexen Einzelknotens in unterschiedlichen Auslastungsfällen. Als Knotensteuerung kommt das dynamische Priorisierungsverfahren aus Abschnitt 2.3 zum Einsatz. Bei wenig Verkehr werden alle Phasen kurz nacheinander bedient. Bei mittleren Auslastungen werden die verkehrstarken Phasen (1 und 2) doppelt so häufig ausgewählt wie die schwächeren (3 und 4). Die Wunschperiode T wird dabei niemals überschritten, notfalls werden Phasen 3 und 4 durch die Zustandsüberwachung eingebunden (dick markiert). Bei maximaler Auslastung verhält sich die Steuerung wie eine Festzeitsteuerung mit Umlaufzeit T .

entstehen. In Abbildung 19 werden manche Phasen häufiger ausgewählt als andere: Verkehrstarke Ströme erhalten kleinst mögliche Bedienfolgezeiten, während verkehrsschwache nur so selten wie nötig bedient werden. Erst an der Auslastungsgrenze, wenn es keinen Spielraum für Optimierungen mehr gibt, schaltet die zustandsüberwachte Steuerung wie eine Festzeitsteuerung in festen Schritten von einer Phase zur nächsten.

Netzstabilisierung

Der lokale Stabilisierungsmechanismus garantiert jedem verkehrabhängig gesteuerten Knoten im Netz die Kapazität einer Festzeitsteuerung. Zwar haben die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Knotenpunkten nach wie vor zur Folge, dass sich die zeitliche Entwicklung des Verkehrsablaufs nur eingeschränkt vorhersagen lässt. Aber es ist ausgeschlossen, dass dadurch irgendein Verkehrsstrom an irgendeinem Knoten bei Bedarf nicht die im Mittel benötigten Grünzeiten erhält. Dadurch können die dynamischen Wechselwirkungen im Netz nicht mehr dazu führen, dass sich Knotenpunkte gegenseitig aufschaukeln. Abbildung 20 zeigt, wie die lokale Zustandsüberwachung das Straßennetz aus Abschnitt 3 stabilisiert.

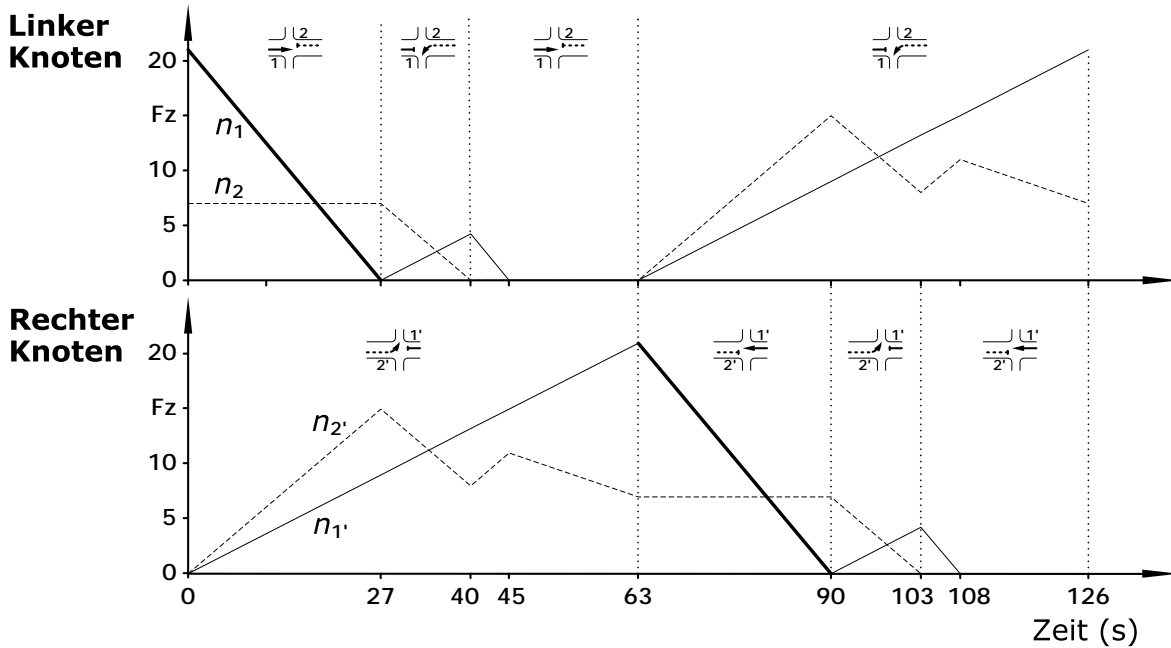


Abbildung 20: Verlauf der Warteschlangen im stabilisierten Straßennetz aus Abschnitt 3. Im Unterschied zu Abbildung 12 wird durch das regelmäßige Eingreifen des Stabilisierungsmechanismus (dicke Linien) ein dynamisches Aufschaukeln verhindert. Die Bedienfolgezeiten sind durch die Wunschperiode T begrenzt. Da jeder Verkehrsstrom zweimal bedient wird, ist die Periode der gesamten Schaltfolge deutlich länger. Verwendete Parameter: $T = 90$ s, $T^{\max} = 120$ s, $S = 1$ Fz/1,8 s und $q_1 = q_2 = 0.6 S$.

Komplexes Netzwerk

Dass sich der vorgestellte Mechanismus in komplizierten Straßennetzen mit hohem ÖV- und Fußgängeranteil einsetzen lässt, konnte von Lämmer u. a. (2009) in einer Simulationsstudie am Beispiel des Stadtgebietes um den Bahnhof Dresden Mitte gezeigt werden. Das Gebiet umfasst 13 lichtsignalisierte Knotenpunkte, die teilweise sehr nahe beieinander liegen und von 7 ÖV-Linien stark frequentiert werden. Derzeit werden die Anlagen mit einer verkehrsabhängigen netzweit koordinierten Steuerung mit relativer ÖPNV-Bevorrechtigung betrieben. Diesem Verfahren wird in der Studie die vollverkehrsabhängige Selbst-Steuerung gegenübergestellt. Sie besteht neben dem vorgestellten Stabilisierungsmechanismus aus zwei weiteren Grundverfahren: einem Antizipationsverfahren, das heranahende Fahrzeugkolonnen erkennt und Koordinierungen in Form dynamischer Grüner Wellen begünstigt, und einem Optimierungsverfahren, das entsprechend der dynamischen Priorisierung (vgl. Abschnitt 2.3) aus allen zulässigen Schaltkombinationen (mehr als hundert je Knoten) die momentan beste auswählt. Fußgängerströme werden als virtuelle Ströme berücksichtigt. Die Fahrzeuge des ÖPNV werden in der Zielfunktion mit einem größeren Faktor gewichtet.

Im Ergebnis konnten Lämmer u. a. (2009) zeigen, dass mit der zustandsüberwachten

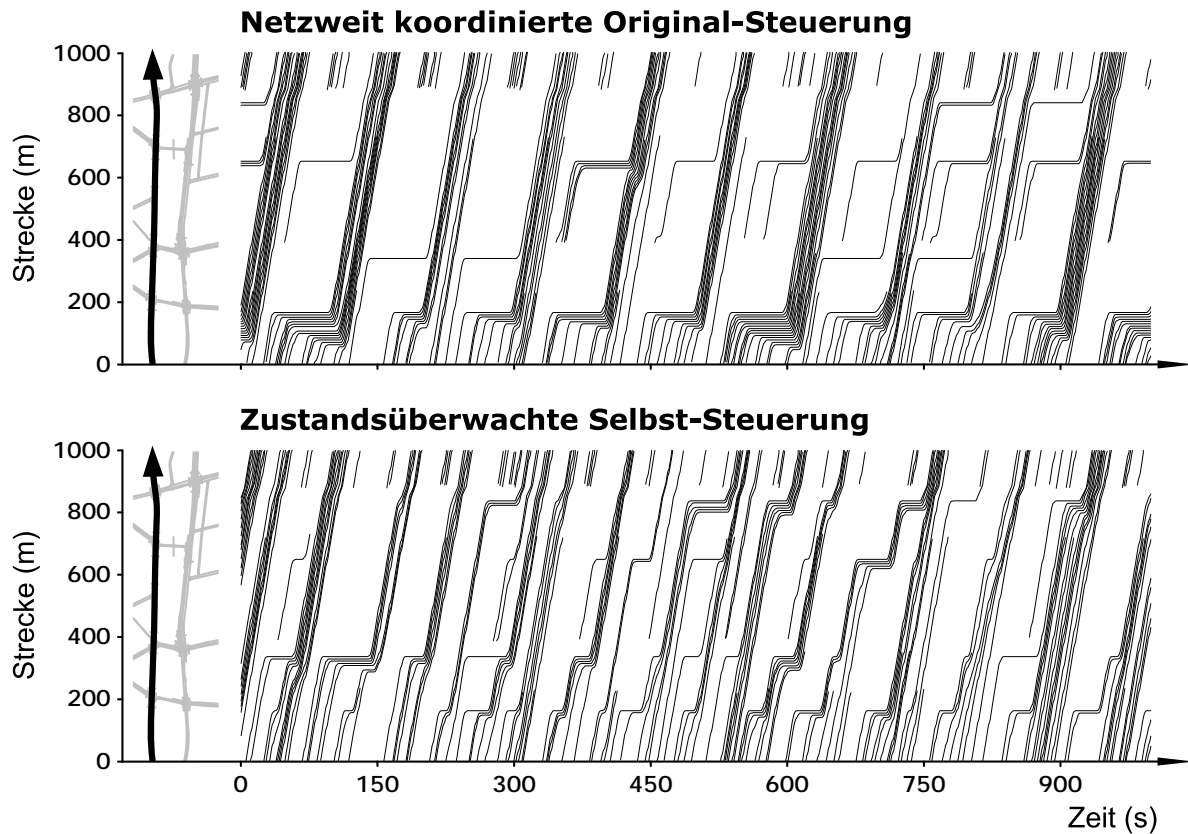


Abbildung 21: Fahrzeugtrajektorien entlang der Könneritzstraße am Bahnhof Dresden Mitte aus einer Simulationsstudie von Lämmer u. a. (2009). Oben: Die netzweit koordinierte Original-Steuerung hält die zufließenden Fahrzeuge am ersten Knoten auf, um sie dann ein Mal innerhalb von 100 Sekunden als Grüne Welle durch das Gebiet zu führen. Unten: Mit der zustandsüberwachten Selbst-Steuerung erhalten die Fahrzeuge des Hauptstroms früher und häufiger Grün. Es entstehen kleinere Kolonnen, die es erlauben, die Konflikte mit Nebenströmen oder kreuzenden Straßenbahnen entlang der Strecke flexibler zu entscheiden.

Selbst-Steuerung Straßenbahnen und Busse an den Knotenpunkten kürzer oder gar nicht aufgehalten werden. Sie sind damit schneller und pünktlicher. Auch die Kraftfahrzeuge fahren im Mittel zügiger durch das Netz, als wenn für sie Grüne Wellen eingerichtet werden. Fußgänger und Radfahrer bekommen bei jeder sich bietenden Gelegenheit Grün, ihre mittlere Wartezeit ist deutlich verkürzt. Abbildung 21 macht die grundsätzlich verschiedenen Ansätze am Beispiel der Kolonnenführung entlang einer Hauptstraße deutlich. Vergleichende Simulationsvideos sind im Internet unter <http://stefanlaemmer.de/selfcontrol> abrufbar.

5 Zusammenfassung

Für eine bedarfsgerechte Gestaltung des Verkehrsablaufs mit ausgewogener ÖV-Beschleunigung sind Lichtsignalsteuerungen notwendig, die flexibel auf lokale Geschehnisse reagieren. Doch mit solchen Steuerungen kann es passieren, dass aufgrund dynamischer Kapazitätsverluste Warteschlangen immer länger werden. Die Ursachen derartiger Stabilitätsprobleme sind vielfältig. Rechenbeispiele konnten dies deutlich machen.

Mit der klassischen Festzeitsteuerung lässt sich die Kapazität der Knotenpunkte innerhalb bestimmter Grenzen vorgeben. Auf dem Ansatz, jeden Strom an jedem Knoten genauso häufig und bei Bedarf genauso lange wie mit einem ausgewählten Festzeitprogramm zu bedienen, basiert der vorgestellte Stabilisierungsmechanismus. Doch statt die Grünzeiten in zeitlich fester Folge zu vergeben, wird das stabilisierende Wirkungsprinzip verkehrsabhängig ausgestaltet. Dadurch werden die zur Stabilisierung nicht unbedingt benötigten Grünzeiten frei und können von der verwendeten Knotensteuerung für zusätzliche Umschaltvorgänge oder Grünzeitverlängerungen genutzt werden. Eine gewünschte Bedienfolgezeit wird im Mittel eingehalten. Eine maximale Bedienfolgezeit wird niemals überschritten, selbst wenn Zuflussdetektoren ausfallen. Durch Wahl des zugrunde liegenden Festzeitprogramms kann eine verkehrsstromfeine Kapazitätszuweisung im übersättigten Fall erfolgen. Der vorgestellte Mechanismus stabilisiert auf diese Weise jede beliebige vollverkehrsabhängige Steuerung. Sie erfüllt sicherheitsrelevante Anforderungen und erlaubt die Umsetzung stadt- und verkehrsplanerischer Ziele.

5.1 Anwendungsfälle

Ein offensichtlicher Anwendungsfall ist die Stabilisierung ursprünglich instabiler Steuerungsverfahren. Aber auch stabile Verfahren können von einem solchen Mechanismus profitieren: Sie könnten ihn als Assistenten einsetzen, der in komplizierten Situationen Hilfestellung zur raschen Stauauflösung gibt.

Durch Erweiterung des vorgestellten Mechanismus sind gänzlich andere Einsatzfälle denkbar, beispielsweise beim Störfallmanagement: Wenn außergewöhnliche Nachfragespitzen aufgrund von Umleitungen oder spontane Kapazitätseinbrüche aufgrund von Unfällen auftreten, kann infolge langer Rückstaus der Abfluss in nachfolgende Streckenabschnitte eingeschränkt sein. Eine Zustandsüberwachung, die neben den Zuflüssen zusätzlich die momentan verfügbaren Abflusskapazitäten berücksichtigt, könnte den Zufluss in überlastete Strecken durch längere Rotzeiten gezielt drosseln. Die dadurch frei werdenden Grünzeiten können unmittelbar freien Richtungsströmen veranschlagt werden. Somit entlastet die Zuflussdrosselung gestörte Bereiche im Netz, während sie gleichzeitig den Ausweichrouten zusätzliche Kapazitäten bereitstellt. Die Umverteilung des Verkehrs ginge Hand in Hand

mit einer Umverteilung der Grünzeiten.

5.2 Fazit

Die Grundsatzfrage ist entschieden: Vollverkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen können die gleiche Verkehrsmenge bewältigen wie Festzeitsteuerungen. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, solche Steuerungen zur flexiblen und bedarfsgerechten Organisation des Verkehrsablaufs in den Städten einzusetzen. Eine ausgewogene ÖV-Beschleunigung und eine dynamische Kolonnenführung können mit solchen Steuerungen Wirklichkeit werden. Mit welchem vollverkehrsabhängigen Steuerungsverfahren dies am besten gelingt, sollen andere Studien herausarbeiten. Doch sicher ist, dass ein solches Verfahren die hier diskutierten Prinzipien nicht außer Acht lassen kann.

Literatur

- [RiL 1992] *Richtlinien für Lichtsignalanlagen – RiLSA*. Köln : Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen e. V., 1992
- [HBS 2005] *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2005
- [Blank u. Bunimovich 2004] BLANK, M. ; BUNIMOVICH, L.: Switched flow systems: pseudo billiard dynamics. In: *Dynamical Systems: An International Journal* 19 (2004), Nr. 4, S. 359–370
- [Boillot u. a. 1992] BOILLOT, F. ; BLOSSEVILLE, J.M. ; LESORT, J.B. ; MOTYKA, V. ; PAPAGEORGIOU, M. ; SELLAM, S.: Optimal signal control of urban traffic networks. In: *Sixth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control* Bd. 355, 1992, S. 75–79
- [Boillot u. a. 2000] BOILLOT, F. ; MIDENET, S. ; PIERRELEE, J. C.: Real-life CRONOS evaluation. In: *Tenth International Conference on Road Transport Information and Control* Bd. 472, 2000, S. 182–186
- [Bramson 2008] BRAMSON, M.: *Stability of Queueing Networks*. Springer, 2008 (Lecture Notes in Mathematics 1950)
- [Braun u. a. 2009] BRAUN, R. ; BUSCH, F. ; KEMPER, C. ; HILDEBRANDT, R. ; WEICHENMEIER, F. ; MENIG, C. ; PAULUS, I. ; PRESSLEIN-LEHLE, R.: TRAVOLUTION – Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation. In: *Straßenverkehrstechnik* 53 (2009), Nr. 6, S. 365–374
- [Busch u. Kruse 1993] BUSCH, F. ; KRUSE, G.: MOTION - Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung in Rahmen des EG-Programms ATT. In: *Heureka!* 93 (1993), S. 79–93
- [Chase u. Ramadge 1992] CHASE, C. ; RAMADGE, P. J.: On real-time scheduling policies for flexible manufacturing systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 37 (1992), Nr. 4, S. 491–496
- [Chase u. a. 1993] CHASE, C. ; SERRANO, J. ; RAMADGE, P. J.: Periodicity and chaos from switched flow systems: contrasting examples of discretely controlled continuous systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 38 (1993), Nr. 1, S. 70–83
- [Devaney 2003] DEVANEY, R. L.: *Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Westview Press, 2003
- [Döge 2004] DÖGE, K.-P.: *Ein Beitrag zur videobasierten Verkehrszustandsidentifikation*. Institut für Verkehrsinformationssysteme, Professur für Verkehrsleitsysteme und -Prozessautomatisierung, TU Dresden, Diss., 2004
- [van Eekelen u. a. 2007] EEKELEN, J. A. W. M. ; LEFEBER, E. ; ROODA, J. E.: State feedback control of switching server flowline with setups. In: *American Control Conference*, 2007, S. 3618–3623

- [Friedrich 2000] FRIEDRICH, B.: Steuerung von Lichtsignalanlagen, BALANCE - ein neuer Ansatz. In: *Straßenverkehrstechnik* 7 (2000), S. 1–44
- [Friedrich 2007] FRIEDRICH, B.: Großer Plan versus Dschungelprinzip. In: *Straßenverkehrstechnik* (2007), Nr. 9, S. 449
- [Fudenberg u. Tirole 1991] FUDENBERG, D. ; TIROLE, J.: *Game theory*. The MIT Press, 1991
- [Gartner 1983] GARTNER, H. N.: OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. In: *Transportation Research Record* 906 (1983), S. 75–84
- [Gartner u. a. 1975] GARTNER, N. H. ; LITTLE, J. D. C. ; GABBAY, H.: Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Linear Programming Part I: The Network Coordination Problem. In: *Transportation Science* 9 (1975), November, Nr. 4, S. 321–343
- [Gartner u. a. 2001] GARTNER, N. H. ; POORAN, F. J. ; ANDREWS, C. M.: Implementation of the OPAC Adaptive Control Strategy in a Traffic Signal Network. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, 2001, S. 195–200
- [Gazis 1964] GAZIS, D. C.: Optimum Control of a System of Oversaturated Intersections. In: *Journal of the Operations Research Society of America* 12 (1964), Nr. 6, S. 815–831
- [Gazis 2002] GAZIS, D. C.: *Traffic Theory*. Springer, 2002 (International Series in Operations Research & Management Science)
- [Helbing 1997] HELBING, D.: *Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Berlin : Springer, 1997
- [Helbing 2001] HELBING, D.: Traffic and related self-driven many-particle systems. In: *Review of Modern Physics* 73 (2001), S. 1067–1141
- [Helbing u. a. 2005] HELBING, D. ; LÄMMER, S. ; LEBACQUE, J.-P.: Self-Organized Control of Irregular or Perturbed Network Traffic. In: DEISSENBERG, C. (Hrsg.) ; HARTL, R. F. (Hrsg.): *Optimal Control and Dynamic Games*. Springer, 2005, S. 239–274
- [Helbing u. a. 2007] HELBING, D. ; SIEGMEIER, J. ; LÄMMER, S.: Self-organized network flows. In: *Networks and Heterogeneous Media* 2 (2007), Nr. 2, S. 193–210
- [Henry u. a. 1983] HENRY, J. J. ; FARGES, J. L. ; TUFAL, J.: The PRODYN Real Time Traffic Algorithm. In: *4th IFAC/IFIP/IFORS International Conference on Control in Transportation Systems*. Baden Baden, 1983, S. 307–311
- [Hofri u. Ross 1987] HOFRI, M. ; ROSS, K.: On the optimal control of two queues with server setup times and its analysis. In: *SIAM journal on computing* 16 (1987), Nr. 2, S. 399–420
- [Huberman u. Lukose 1997] HUBERMAN, B. A. ; LUKOSE, R. M.: Social Dilemmas and Internet Congestion. In: *Science* 277 (1997), Nr. 5325, S. 535–537

- [Hunt u. a. 1981] HUNT, P. B. ; ROBERTSON, D.I. ; BRETHERTON, R. D. ; WINTON, R. I.: SCOOT: a traffic responsive method of coordinating signals / Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, 1981 (1041). – Forschungsbericht
- [Jin u. Heydecker 1998] JIN, W. ; HEYDECKER, B. G.: Analysis of Travel Time by Vertical Queue. In: *Traffic and Transportation Studies: Proceedings of ICTTS'98*, 1998, S. 310–319
- [Kastrinaki u. a. 2003] KASTRINAKI, V. ; ZERVAKIS, M. ; KALAITZAKIS, K.: A survey of video processing techniques for traffic applications. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003), S. 359–381
- [Kirchhoff 2002] KIRCHHOFF, P.: *Städtische Verkehrsplanung: Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*. Vieweg+Teubner, 2002
- [Kobbeloer 2007] KOBBELOER, D.: *Dezentrale Steuerung von Lichtsignalanlagen in urbanen Verkehrsnetzen*, Universität Kassel, Diss., 2007
- [Kumar u. Seidman 1990] KUMAR, P. R. ; SEIDMAN, T. I.: Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 35 (1990), Nr. 3, S. 289–298
- [Kumar u. Meyn 1995] KUMAR, P.R. ; MEYN, S. P.: Stability Of Queueing Networks And Scheduling Policies. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 40 (1995), Nr. 2, S. 251–260
- [Lämmer 2007] LÄMMER, S.: *Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken*, Technische Universität Dresden, Diss., 2007
- [Lämmer u. a. 2007] LÄMMER, S. ; DONNER, R. ; HELBING, D.: Anticipative control of switched queueing systems. In: *The European Physical Journal B* 63 (2007), Nr. 3, S. 341–347
- [Lämmer u. Helbing 2008] LÄMMER, S. ; HELBING, D.: Self-Control of Traffic Lights and Vehicle Flows in Urban Road Networks. In: *Journal of Statistical Physics* (2008)
- [Lämmer u. a. 2009] LÄMMER, S. ; KRIMMLING, J. ; HOPPE, A.: Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken – Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. In: *Straßenverkehrstechnik* 11 (2009), 714-721. <http://stefanlaemmer.de/selfcontrol>
- [Lefeber u. Rooda 2006] LEFEBER, E. ; ROODA, J. E.: Controller design for switched linear systems with setups. In: *Physica A* 363 (2006), Nr. 1, S. 48–61
- [Little 1966] LITTLE, J. D. C.: The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming. In: *Operations Research* 14 (1966), Nr. 4, S. 568–594
- [Litzenberger u. a. 2007] LITZENBERGER, M. ; KOHN, B. ; GRITSCH, G. ; DONATH, N. ; GARN, H.: Ein innovatives, optisches Sensorsystem für die Verkehrsdatenerfassung. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 124 (2007), Nr. 4, S. 96–101

- [Lorenz 1963] LORENZ, E. N.: Deterministic Nonperiodic Flow. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (1963), Nr. 2, S. 130–141
- [Mauro u. Taranto 1990] MAURO, V. ; TARANTO, C. D.: UTOPIA. In: *Proceedings of the Sixth IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control and Communication in Transportation*. Paris, France, 1990
- [McNaughton 1959] MCNAUGHTON, R.: Scheduling with Deadlines and Loss Functions. In: *Management Science* 6 (1959), Nr. 1, S. 1–12
- [Mirchandani u. Wang 2005] MIRCHANDANI, P. ; WANG, F.-Y.: RHODES to Intelligent Transportation Systems. In: *IEEE Intelligent Systems* 10 (2005), Nr. 1, S. 10–15
- [Mück 2008] MÜCK, J.: Neue Schätz- und Optimierungsverfahren für Adaptive Netzsteuerungen. In: *Straßenverkehrstechnik* 52 (2008), Nr. 12, S. 761–773
- [Nagatani 2005] NAGATANI, T.: Chaos and dynamical transition of a single vehicle induced by traffic light and speedup. In: *Physica A* 348 (2005), S. 561–571
- [O’Flaherty u. Bell 1996] O’FLAHERTY, C. A. ; BELL, M. G. H.: *Transport planning and traffic engineering*. Butterworth Heinemann, 1996
- [van Oyen u. a. 1992] OYEN, M. P. ; PANDELIS, D. G. ; TENEKETZIS, D.: Optimality of index policies for stochastic scheduling with switching penalties. In: *Journal of Applied Probability* 29 (1992), Nr. 4, S. 957–966
- [Papageorgiou u. a. 2003] PAPAGEORGIOU, M. ; DIAKAKI, C. ; DINOPOULOU, V. ; KOTSIALOS, A. ; WANG, Y.: Review of Road Traffic Control Strategies. In: *Proceedings of the IEEE* 91 (2003), Nr. 12, S. 2043–2067
- [Perkins u. Kumar 1989] PERKINS, J. ; KUMAR, P. R.: Stable, distributed, real-time scheduling of flexible manufacturing/assembly/diassembly systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989), Nr. 2, S. 139–148
- [Peters u. Parlitz 2003] PETERS, K. ; PARLITZ, U.: Hybrid systems forming strange billiards. In: *International Journal of Bifurcation and Chaos* 19 (2003), Nr. 9, S. 2575–2588
- [Porche u. a. 1996] PORCHE, I. ; SAMPATH, M. ; SENGUPTA, R. ; CHEN, Y.-L. ; LAFORTUNE, S.: A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signals. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications*, 1996, S. 582–589
- [Prothmann u. a. 2009] PROTHMANN, H. ; BRANKE, J. ; SCHMECK, H. ; TOMFORDE, S. ; ROCHNER, F. ; HAHNER, J. ; MÜLLER-SCHLOER, C.: Organic traffic light control for urban road networks. In: *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems* 2 (2009), Nr. 3
- [Rothkopf u. Smith 1984] ROTHKOPF, M. H. ; SMITH, S. A.: There are no undiscovered priority index sequencing rules for minimizing total delay costs. In: *Operations Research* 32 (1984), Nr. 2, S. 451–456

- [von de Ruhren 2006] RUHREN, S. von d.: *Kurzfristprognosen von Verkehrszuständen auf Basis von Verfahren der Mustererkennung und von dynamischen Routensuch- und Umlegungsverfahren*, RWTH Aachen, Diss., 2006
- [Rybko u. Stolyar 1992] RYBKO, A. N. ; STOLYAR, A. L.: Ergodicity of stochastic processes describing the operation of open queueing networks. In: *Problems of Information Transmission* 28 (1992), S. 3–26
- [Safonov u. a. 2002] SAFONOV, L. A. ; T., E. ; STRYGIN, V. V. ; ASHKENAZY, Y. ; HAVLIN, S.: Multifractal chaotic attractors in a system of delay-differential equations modeling road traffic. In: *Chaos* 12 (2002), Nr. 4, S. 1006–1014
- [Savkin 1998] SAVKIN, A. V.: Controllability of complex switched server queueing networks modelled as hybrid dynamical systems. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* Bd. 4, 1998, S. 4289–4293
- [Schuster u. Just 2005] SCHUSTER, H. G. ; JUST, W.: *Deterministic Chaos*. Wiley-VCH, 2005
- [Seydel 2008] SEYDEL, I.: *Möglichkeiten der Nutzung multivariater Analysemethoden zur Untersuchung von Verkehrsdaten*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2008
- [Smith 1956] SMITH, W. E.: Various optimizers for single-stage production. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 3 (1956), S. 59–66
- [Steierwald u. a. 2005] STEIERWALD, G. ; KÜNNE, H.-D. ; VOGT, W.: *Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin : Springer, 2005
- [Toledo u. a. 2004] TOLEDO, B. A. ; MUNOZ, V. ; ROGAN, J. ; TENREIRO, C. ; VALDIVIA, J. A.: Modeling traffic through a sequence of traffic lights. In: *Physical Review E* 70 (2004), Nr. 016107
- [Webster 1958] WEBSTER, F. V.: Traffic Signal Settings. In: *Road Research Technical Paper* 39 (1958), S. 1–44
- [Wiggins 2003] WIGGINS, S.: *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*. Springer, 2003 (Texts in Applied Mathematics)
- [Yu u. Vakili 1996] YU, G.-X. ; VAKILI, P.: Periodic and chaotic dynamics of a switched-server system undercorridor policies. In: *Automatic Control* 41 (1996), Nr. 4, S. 584–588