

Ermittlung von Optimierungspotenzialen bestehender und zukünftiger Streckenbeeinflussungsanlagen

FA 3.523

Forschungsstelle: Dipl.-Ing. G. Schwietering Beratender Ingenieur für das Bauwesen, Aachen
RWTH Aachen, Institut für Regelungstechnik (Prof. Dr.-Ing. D. Abel)

Bearbeiter: Schwietering, C. / Maier, F. / Pyta, L. / Hakenberg, M. / Abel, D.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Mai 2019

1 Problemstellung und Zielsetzung

Zur Vermeidung von Staus und Unfällen sowie zur verkehrsträglichen Abwicklung werden Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Autobahnen in Deutschland eingesetzt. Diese gliedern sich in Netzbeeinflussungsanlagen (NBA), Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses sowie Knotenpunktbeeinflussungsanlagen (KBA). Im Fokus des hier beschriebenen Forschungsvorhabens standen SBA.

SBA folgen im Wesentlichen den Festlegungen des "Merkblatts für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen MARZ" (BASt, 1999). Grundlage für SBA-Schaltentscheidungen sind Verkehrs- und Umfelddaten. Diese werden an lokalen Messquerschnitten (MQ) im Abstand von ca. 2 km (Verkehrsdaten) beziehungsweise ca. 5 km (Umfelddaten) erfasst und als repräsentativ für den zugeordneten Streckenabschnitt angenommen. Auf Basis dieser lokalen Daten erfolgt zunächst eine Situationsbewertung des Verkehrs- und Witterungszustands. Wird ein für den Verkehrsablauf kritischer Zustand ermittelt, wird am zugeordneten Anzeigequerschnitt (AQ) eine Maßnahme (Schaltbild) angelegt. Anhand hinterlegter Regeln wird in der Schaltbildermittlung eine Trichterung des Schaltbilds angelegt, sodass der Verkehr räumlich frühzeitig und abgestuft auf stromabwärts gelegene Gefahren hingewiesen wird und Geschwindigkeiten in angemessenen Schrittweiten vor der Gefahrenstelle reduziert werden.

Die im MARZ definierte feste Zuordnung einer Situation zu einer Maßnahme impliziert ein fest definiertes Detektions- und Maßnahmenpektrum. Integrierte Entscheidungen, die die Anzeigen an anderen Querschnitten und ihre Wirkungen berücksichtigen, sind nicht vorgesehen. Die derzeit bestehende Steuerung beinhaltet zudem keine Wirkungsanalyse. Aufgrund des komplexen Zusammenhangs zwischen Akzeptanz und Befolgung sowie deren hochdynamischen Einflüssen werden diese in der Maßnahmenauswahl derzeit nicht berücksichtigt.

Damit bleiben Wirkungspotenziale von SBA ungenutzt. Teile dieser Wirkungspotenziale könnten durch die Umsetzung des neuen Steuerungsmodells nach MARZ 2018 (BASt, 2018) adressiert werden. Ein weiterer Ansatz, wesentliche Teile dieser Potenziale zu heben, ist die Ablösung des bisherigen steuerungs-basierten durch einen regelungstechnischen Ansatz. Der wesentliche Unterschied zu den aktuellen Umsetzungen für die variable Geschwindigkeitsvorgabe ist dabei, dass die Wirkung einer Maßnahme bei einer Regelung stets durch Abgleich zwischen dem mit der Maßnahme erzielten Ist-Zustand und dem angestrebten Sollzustand untersucht wird, was eine Wirkungsanalyse impliziert. Weiterhin wird der Übergang von der vielfachen

lokalen Betrachtung eines Streckenabschnitts hin zu einer makroskopischen und streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung, bei welcher der Verkehrszustand entlang der gesamten Strecke berücksichtigt wird, um die Geschwindigkeitsvorgaben ebenfalls entlang der gesamten Strecke anzupassen.

Das Forschungsprojekt sollte zeigen, welches Optimierungspotenzial hinsichtlich des Verkehrsablaufs durch den Einsatz von SBA abgerufen werden kann, wenn die bislang durchgeführte Steuerung des Verkehrsablaufs in eine Regelung überführt wird.

Das Projekt soll den Workflow der Verkehrsbeeinflussung grundsätzlich neu bewerten. Bisher durchgeführte und bewährte Methoden sollen dabei zunächst bewusst nicht berücksichtigt werden, um einen idealen Ansatz für eine SBA-Regelungslogik zu definieren. Dies betrifft nicht nur die Definition der Regelung selbst, sondern auch die Mess- und Anzeiginfrastruktur sowie die Vorgaben an die Verkehrsteilnehmer. Ganz bewusst soll zunächst ungeachtet möglicher Kosten ein Ideal-Szenario definiert werden. Abschließend ausgegebene Handlungsempfehlungen enthalten Teilschritte für eine sukzessive Umsetzung der Regelungslogik für SBA, die auf maximierte Wirkungen für den jeweiligen Umsetzungsgrad und auf die fokussierte Gewinnung weiterer relevanter Erkenntnisse zielen.

2 Untersuchungsmethodik

Einleitend wurde der Stand der Technik bezüglich der Themenbereiche Verkehrsablauf, -detektion, -modelle, -beeinflussung und Regelungstechnik ermittelt. Ziel war die Darstellung der Ausgangslage hinsichtlich der in der Praxis eingesetzten Verkehrssteuerung und der Beschreibung des Potenzials durch den Einsatz von Regelungstechnik in der Verkehrsbeeinflussung und der Herausarbeitung derzeit vorhandener Defizite. Nachfolgend wurden Untersuchungen hinsichtlich des Optimums des Verkehrsablaufs, insbesondere bei hoher Streckenauslastung, durchgeführt, um daraus geeignete Regel- und Führungsgrößen für die Regelung des Verkehrsablaufs abzuleiten. Dabei wurden bewusst keine Einschränkungen hinsichtlich der Verkehrsdetektion betrachtet, sondern die Untersuchung auf Basis von synthetischen Daten eines kalibrierten mikroskopischen Simulationsmodells durchgeführt, das sämtliche Fahrzeugbewegungen aufzeichnen und zur Auswertung bereitstellen kann. Somit wurde abweichend von der aktuellen Praxis von einer zeitlich-räumlich lückenlosen Kenntnis des Verkehrsgeschehens bei der Wahl der Regel- und Führungsgrößen ausgegangen.

Aufbauend auf diesen verkehrstechnischen Erkenntnissen wurde ein Gesamtregelkreis aufgestellt und durch die Umsetzung zweier Maßnahmen (Pulkauflösung, Stauvermeidung) beispielhaft erprobt.

Der Regleraufbau mit den zugrundeliegenden Regel- und Stellgrößen hat Auswirkungen auf die notwendige Detektion zur Erfassung der Regelgrößen und das Maßnahmenpektrum zur Umsetzung der Stellgrößen, die ebenfalls ausführlich diskutiert werden. Auch hier wurde zunächst bewusst von Idealszenarien ausgegangen, ungeachtet der aktuell praktisch umsetzbaren Möglichkeiten. Die daraus abgeleiteten Anforderungen wurden in Handlungsempfehlungen strukturiert, zeitlich geordnet und auf praktische Umsetzbarkeit überprüft. Ziel war die Aufstellung einer Roadmap zur schrittweisen Erprobung und Umsetzung des regelungstechnischen Konzepts in die Verkehrsbeeinflussung.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Beschreibung des Verkehrsablaufs und Auswahl der Regel- und Führungsgrößen

Der Verkehrsablauf auf Autobahnen kann grundsätzlich mit den etablierten SBA-Eingangsgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit, der Verkehrsdichte sowie der verwandten Kenngröße lokale Verkehrsdichte und Belegungsgrad beschrieben werden, außerdem mit Abstandskennzahlen, Verteilungsparametern oder kombinierten Kenngrößen. Zusätzlich sollten Führungsgrößen als Zielwert der Regelgröße(n) festgelegt werden, die einen noch stabilen, idealen Verkehrsablauf beschreiben und somit einen Zielzustand, auch bei hohem Verkehrsaufkommen, beschreiben. Bei der Verkehrsdatenerfassung werden im weiteren Verlauf kürzere Aggregierungsintervalle (zum Beispiel 15 Sekunden) und kürzere Abstände zwischen Messquerschnitten (zum Beispiel 500 Meter) als bisher üblich (60 Sekunden, ca. alle 2 km) hinsichtlich ihres Mehrwerts für eine Regelung analysiert.

In der Analyse wurden nicht nur reale Verkehrsdatenmuster betrachtet, sondern auch simulative Daten der ausgewählten Testfelder A 5 in Hessen, A 7 in Hamburg und A 1 in der Schweiz verwendet. Das Simulationsdatenset verfügt über vollständige Kenntnis des Verkehrsablaufs, da alle Fahrzeugpositionen und -bewegungen aus der Simulation ausgelesen werden können und zu Bildung und Auswahl geeigneter Regelgrößen zur Verfügung standen. Bei der Auswertung der Verkehrsdaten wurden zeitlich-räumliche Zusammenhänge mithilfe von Konturplots, zahlreiche Streudiagramme und die Eigenschaften untersuchter Kenngrößen bezüglich der zuverlässigen Vorankündigungen von Störungen des Verkehrsflusses betrachtet.

Als Grundlage für die Regelgröße wurden mit lokaler Verkehrsdichte und Belegungsgrad zwar grundsätzlich "klassische" Kenngrößen des Verkehrsablaufs empfohlen, die aber nicht mit einer eindeutigen absoluten Führungsgröße belegt werden können. Vielmehr wurde ein Zielzustand im Sinne einer gleichmäßigen zeitlich-räumlichen Verteilung der Fahrzeuge auf einer Strecke als Zielkriterium für den Regler definiert. Mathematisch ergibt sich daraus die Zielsetzung, die streckenbezogene Ableitung der gewählten Größe als Regelgröße festzulegen und dem Wert 0 als Führungsgröße bestmöglich anzunähern. Somit wurden pulkbezogene Effekte beabsichtigt mit dem Ziel des Reglers,

- Pulks aufzulösen, indem Fahrzeuge am Anfang des Pulks beschleunigen und Fahrzeuge am Ende des Pulks ihre Geschwindigkeit reduzieren, und
- existierende Pulks, die sich zeitlich-räumlich aufeinander zubewegen, so zu beeinflussen, dass sie zeitlich-räumlich versetzt auf den als kritisch erachteten Punkt treffen.

Wichtig ist zu betonen, dass der hier konzipierte Regler diese Ziele nur dann verwirklichen kann, wenn die Verkehrsnachfrage die Kapazität einer Strecke nicht übersteigt.

3.2 Aufstellung des Gesamtregelkreises

Ziel dieses Kapitels ist es, die Struktur des Gesamtregelkreises zu ermitteln. Hierzu gehören insbesondere die Auswahl der Regel- und Führungsgrößen aus regelungstechnischer Sicht und die Zuordnung dieser zu den verfügbaren Stellgrößen. Zudem muss die Struktur des Regelkreises festgelegt werden, für welche aus der regelungstechnischen Literatur zahlreiche Formen bekannt sind. Um die Auswahl, Zuordnung und Strukturierung

systematisch vollziehen zu können, ist es klassischerweise der erste Schritt in der Regelungstechnik, das zu regelnde System (Regelstrecke) mit einem geeigneten Verkehrsmodell zu simulieren.

Nach der Modellierung und Kalibrierung der Regelstrecke anhand realer Verkehrsdaten des Testfelds Hessen, wurden die Regelgrößen über Kostenfunktionen analysiert. Der entworfene Regler verfolgt die beiden Hauptziele Pulkauflösung, vorrangig auf längeren Regelstrecken anwendbar, und Stauvermeidung für verbundene, aufeinander zulaufende Streckenabschnitte (siehe Abschnitt 3.4).

Für beide Optimierungsprobleme konnte im Vergleich zu den Szenarien "nichts tun" und "MARZ-Steuerung" festgestellt werden, dass der entwickelte Regler Vorteile in der Optimierung des Verkehrsflusses mit sich bringt, vor allem dann, wenn detailliertes Wissen über den vorhandenen Verkehrsfluss vorliegt und die messtechnische Ausstattung eine hinreichend genaue Rekonstruktion der Regelgröße zulässt. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Detektion, die ein ideales Agieren des Reglers erlauben.

3.3 Anforderungen an die Detektion

Je weniger die eingehenden Daten isoliert Verkehrszustände und durch den Regler herbeigeführte Wirkungen beschreiben, umso weniger kann es dem Regler gelingen, ideale Maßnahmenbündel zur Beeinflussung des Verkehrsablaufs abzuleiten. Längere Aggregierungsintervalle verlängern zum einen die Reaktionszeit des Reglers, zum anderen begünstigen sie stärkere Veränderungen des Verkehrsflusses ohne eine Reaktion der SBA, sodass der erwünschte Reglereingriff in den Verkehrsablauf potenziell stärker ausfällt. Theoretische Überlegungen und simulationsbasierte Tests führen zum Ergebnis, dass ideale Erhebungsintervalle im Bereich von 15 bis 30 s liegen, Abstände zwischen jeweils aufeinanderfolgenden Mess- und Anzeigequerschnitten im Bereich von 1 bis 2 km. Dabei ist von Bedeutung, dass ein Messquerschnitt im Idealfall 500 bis 1 000 m vor einem Anzeigequerschnitt liegt.

3.4 Maßnahmenspektrum

Zunächst wurden die grundsätzlichen Rahmenbedingungen zur Definition von Maßnahmen erläutert. Wesentliche Konzeptionsänderung im Vergleich zur bisherigen Praxis nach MARZ ist, dass die räumlich-zeitliche Zuordnung von Maßnahmen nicht mehr in fester, vordefinierter Zuordnung eines Messquerschnitts zu einem Anzeigequerschnitt erfolgt, stattdessen wird sie dynamisch im räumlichen Kontext definiert. Auswirkungen auf die Infrastruktur, also die technische Ausstattung der Strecke hinsichtlich Sensorik und Aktorik, wurden diskutiert. Durch den Reglerentwurf können neue Maßnahmen in der Streckenbeeinflussung umgesetzt werden.

Als präventive Maßnahme zur Vermeidung von kritischen Verkehrssituationen im Grenzbereich von Nachfrage und Kapazität wurde die Maßnahme "Pulkauflösung" eingeführt. Wenn eine lokale Verdichtung des Verkehrs detektiert wurde, soll am stromaufwärts gelegenen Pulkende eine Geschwindigkeitsbeschränkung angeordnet werden, die unterhalb der Pulkgeschwindigkeit liegen muss. Damit soll verhindert werden, dass sich weitere Fahrzeuge dem Pulk anschließen, außerdem sollen sich infolgedessen die hinteren Fahrzeuge nach hinten aus dem Pulk herauslösen. Am stromabwärts gelegenen Pulkankfang werden

Fahrzeuge beschleunigt, damit diese den Pulk nach vorne verlassen.

Als weitere präventive Maßnahme wurde die Maßnahme "Stauvermeidung" eingeführt. Idee dahinter ist, dass das Aufeinandertreffen kritischer Fahrzeugpulkts von unterschiedlichen Zulaufstrecken kommend vermieden werden soll, indem die Pulkgeschwindigkeit durch entsprechende Geschwindigkeitsbeschränkungen so beeinflusst wird, dass die identifizierten kritischen Fahrzeugpulkts zeitlich versetzt auf den Engpass treffen. Um Pulkts derart zu beeinflussen, dass sie zeitlich verzögert auf den potenziellen Engpass treffen, müssen sie auf einer längeren Vorlaufstrecke beeinflusst werden.

Abschließend wurden zukünftige Entwicklungen vorgestellt, die durch eine regelungstechnische Umsetzung in der Streckenbeeinflussung möglich werden.

3.5 Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen zur Einführung und Umsetzung der Projektergebnisse in der Praxis wurden formuliert und eine Roadmap wurde aufgestellt. Neben den fachlichen Aspekten, die im Rahmen des Projekts im Fokus stehen, müssen dabei auch organisatorische und rechtliche Fragestellungen betrachtet werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen ist die Eingliederung der Regelung in die MARZ-Architektur sowie das Zusammenspiel von klassischer Steuerung und Regelung auf der technischen Ebene bis hin zur Schaltbildermittlung.

So wurde die Integration der Regelung in das Umfeld gemäß MARZ (2018), die Anforderungen an die telematische Infrastruktur für einen sinnvollen Einsatz des Regelkreises und die sich ergebenden organisatorischen Anforderungen beschrieben. Zusätzlich wurden rechtliche Fragestellungen formuliert, die im Rahmen der Umsetzung des Regelkreises geklärt werden müssen.

Abschließend wurde eine Roadmap zur möglichen Einführung und Überführung des entwickelten Regleransatzes in den Regelbetrieb aufgestellt. Nach einer Studie, basierend auf einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell zur Konkretisierung des Reglers und dessen Wirkungen, soll zunächst ein Pilotprojekt mit dem Fokus aufgrundsätzliche Umsetzbarkeit und Konkretisierung des Nutzens umgesetzt werden. Nach erfolgreicher Erprobung kann dann eine vollständige Integration in den Workflow der Verkehrsrechnerzentralen erfolgen.

4 Fazit und Ausblick

Das Forschungsprojekt hatte die Aufstellung eines Regelkreises für Streckenbeeinflussungsanlagen als Alternative zu den derzeit eingesetzten Steuerungsmodellen sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Überführung der Projektergebnisse in die Praxis zum Ziel.

Aufbauend auf einer Literaturübersicht zu den Themen Verkehrsablauf, -detektion, -modelle, -beeinflussung und Regelungstechnik wurde zunächst der Verkehrsablauf anhand von modelltheoretischen Überlegungen analysiert und hinsichtlich der Nutzung von betrachteten Kenngrößen als Regelgrößen diskutiert. Darauf aufbauend wurde ein Regelkreis für SBA entwickelt und validiert mit dem Ziel, Pulkts aufzulösen und Stau zu vermeiden. Für diese beiden Optimierungsprobleme konnte im Vergleich zu den Szenarien "ohne Steuerung" und "MARZ-Steuerung" festgestellt werden, dass der entwickelte Regler Vorteile

in der Optimierung des Verkehrsflusses mit sich bringt. Im Gegensatz zur MARZ-Steuerung, welche unmittelbar auf den seitens der Detektion erfassten Daten aufbaut, benötigt der entworfene Regler detailliertes Wissen über den vorhandenen Verkehrsfluss und eine messtechnische Ausstattung, die eine hinreichend genaue Rekonstruktion der Regelgröße zulässt. Aus dem konzipierten Regelkreis wurden Anforderungen an die Detektion und das Maßnahmenpektrum abgeleitet. Abschließend wurden Handlungsempfehlungen zur Einführung der Projektergebnisse in die Praxis formuliert.

Die Einführung der Regelungstechnik in die Streckenbeeinflussung kann insbesondere im Bereich der präventiven Maßnahmen zur Pulkauflösung und Stauvermeidung im Grenzbereich von Nachfrage und Kapazität einen wertvollen Beitrag leisten. Auch mit der aktuell eingesetzten Detektions- und Anzeigetechnologie kann nach simulativen Ergebnissen ein Nutzen generiert werden. Dieser kann bei Einsatz zukünftiger Technologien, insbesondere der C2X-Kommunikation, weiter gesteigert werden. Im Sinne der formulierten Roadmap wird empfohlen, zunächst in einem geeigneten Testgebiet Praxiserfahrungen mit dem vorgeschlagenen Regler zu sammeln. Die gewonnenen Erkenntnisse können dann in einem weiteren Schritt in der Integration in Verkehrsrechnerzentralen verwendet werden. Ebenso wird Potenzial darin gesehen, einen integrierten Regelungsansatz über alle Verkehrsbeeinflussungstypen hinweg zu verfolgen.