

Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

FE 3.605

Forschungsstellen: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen - Planung und Management (Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeldt)
Ingenieurbüro Schwietering, Aachen

Bearbeiter: Geistefeldt, J. / Schwietering, C. / Abarghooie, M. / Marnach, H.

Auftraggeber: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bonn

Abschluss: April 2024

1 Problemstellung und Zielsetzung

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) werden eingesetzt, um den Verkehrsfluss zu verbessern und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Wesentliche Bestandteile von SBA sind Messquerschnitte (MQ) zur Datenerfassung und Anzeigequerschnitte (AQ) zur Informationsübermittlung an die Verkehrsteilnehmenden. Die Abstände zwischen MQ beziehungsweise AQ sollen so gewählt werden, dass die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit eingehalten und die angestrebten verkehrlichen Nutzen erreicht werden. Sowohl für MQ als auch für AQ gibt es Regelabstände, die für die Planung als Orientierung dienen. Die Anordnung der MQ und AQ hängt jedoch auch von den örtlichen Gegebenheiten wie zum Beispiel der Lage von Einfahrten und der Übersichtlichkeit der Trassenführung ab. Daher sind in Deutschland im Vergleich zwischen den SBA teils stark variierende Querschnittsabstände für die Sensorik und Aktorik umgesetzt worden. Eine empirische Überprüfung der Regelabstände wurde bisher nicht durchgeführt.

In der Untersuchung wurde die Wirksamkeit von Harmonisierungs- und Stauwarnungsschaltungen in Abhängigkeit von den MQ- und AQ-Abständen analysiert. Es wurde untersucht, inwiefern Abstände von AQ zueinander, Abstände von MQ zueinander sowie die Zuordnung von MQ (als Situationsauslösung) zu einem AQ (als Maßnahmenumsetzung in Form eines Schaltbilds) Auswirkungen auf die Wirksamkeit haben. Im Mittelpunkt stand die Frage, inwieweit kürzere AQ-Abstände die Befolgung von Geschwindigkeitsbeschränkungen erhöhen. Somit lag der Fokus des Projekts ausschließlich auf der Bewertung des Verkehrsablaufs.

2 Untersuchungskonzept

Zunächst wurden Forschungsfragen definiert, die die wesentlichen Aspekte der Bewertung der MQ-/AQ-Abstände hinsichtlich der Harmonisierungswirkung und damit der Verkehrsqualität berücksichtigen. Darauf aufbauend wurde ein Untersuchungs- und Erhebungskonzept entwickelt, das Verkehrssituationen räumlich und zeitlich detailliert und mit hoher Genauigkeit zur

Analyse von verkehrstechnisch sinnvollen Detektions- und Informationsabständen abbildet.

Im Rahmen der empirischen Untersuchung wurde ein breites Spektrum bestehender SBA dokumentiert und bewertet. Bei der empirischen Analyse wurden verschiedene Kombinationen von Abständen zwischen MQ und AQ sowie Zuordnungen von MQ zu AQ betrachtet. Die verkehrlichen Charakteristika der Strecke, die Anlagenkonfigurationen sowie die Steuerungseigenschaften und damit die mehrfach kausalen Zusammenhänge und Wechselwirkungen mit der Wirksamkeit von SBA wurden bei der Analyse mitberücksichtigt.

Die zentrale Grundlage der empirischen Analyse war die Erhebung von mikroskopischen Verkehrsdaten von Autobahnen mit SBA. Dadurch war es möglich, die relevanten Verkehrskenngrößen sowohl mikroskopisch für jedes Fahrzeug als auch makroskopisch für ein Kollektiv, zum Beispiel innerhalb einer Dichtewelle im Verkehrsfluss, zu betrachten. Die Verzögerung zwischen dem Eintreten der realen räumlich-zeitlichen Situation und der daraus resultierenden Maßnahmenumsetzung (Schaltbild) wurde ebenfalls in Abhängigkeit von den Messzyklen untersucht. Zudem wurde eine umfangreiche Analyse von Verkehrsdaten durchgeführt, die für einen deutlich längeren Zeitraum sowie eine große Anzahl von Streckenabschnitten ausgewertet wurden mit dem Ziel, abgesicherte und statistisch signifikante Erkenntnisse zu gewinnen. Mit dem Untersuchungskonzept ist es grundsätzlich möglich, gegebenenfalls vorhandene Wirkungsunterschiede, die sich aus unterschiedlichen AQ- beziehungsweise MQ-Abständen von SBA ergeben, zu analysieren. Eine absolute Nutzenbetrachtung ist nur über Vorher-Nachher-Vergleiche für neu realisierte Anlagen möglich.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 FCD-basierte Analysen

Im Rahmen der FCD-basierten Analyse der Befolgung von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden Einzelfahrzeugdaten aus dem Jahr 2019 für sechs verschiedene SBA auf einer Streckenlänge von 129 km ausgewertet. Untersucht wurden AQ-Abstände zwischen 467 und 2 544 m, welche in ihrer Verteilung weitgehend repräsentativ für die in Deutschland gebauten SBA sind. Die AQ-Standorte und -Abstände ergeben sich dabei nicht nur aus steuerungstechnischen Erwägungen, sondern auch aus den Sichtbeziehungen in Abhängigkeit von der Streckengeometrie und gegebenenfalls vorhandenen Überführungsbauwerken sowie der verkehrsrechtlichen Erfordernis, dem an Einfahrten zufließenden Verkehr die für den vorausliegenden Streckenabschnitt geltenden Vorschriftzeichen anzuzeigen.

Empirische Analysen von lokalen Verkehrsdaten der SBA, Einzelfahrzeugdaten aus Floating Car Data (FCD) und Trajektorien aus Luftbildanalysen zur systematischen Bewertung der Wirkung von AQ-Abständen auf die Verkehrsqualität haben für unterschiedliche AQ-Abstände grundsätzlich eine gute Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen ab 100 km/h aufwärts mit mittleren Überschreitungen von weniger als 10 km/h gezeigt. Die Anzeigen restriktiverer Geschwindigkeitsbeschränkungen wurden weniger gut befolgt.

Restriktive Geschwindigkeitsbeschränkungen in SBA werden neben der Stauwarnung auch im Rahmen der Harmonisierung als präventive Maßnahmen zur Vermeidung oder Verzögerung kritischer Verkehrszustände verwendet, wobei eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h mit einer mittleren Überschreitung von 18,8 km/h besser befolgt wird als die Geschwindigkeitsbeschränkung einer Stautrichterung. Während Stauwarnungsschaltungen wurden Geschwindigkeitsbeschränkungen von 60 km/h im Mittel um 38,6 km/h überschritten, Geschwindigkeitsbeschränkungen von 80 km/h um 32,1 km/h.

Die Ergebnisse der umfangreichen Auswertung von Einzelfahrzeugdaten aus FCD wurden anhand von qualitativen Analysen räumlich-zeitlicher Fahrzeugtrajektorien aus drohnengestützten Videoaufnahmen für einen von wechselnden Verkehrszuständen betroffenen Streckenabschnitt bestätigt.

3.2 Verkehrsflusssimulationen

Mithilfe der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wurden die Schaltprogramme "Harmonisierung" und "Stauwarnung" nach dem MARZ (2018) nachgebildet. Die Ergebnisse der Simulation bestätigten im Wesentlichen die Ergebnisse der empirischen Datenanalysen. Es konnten geringfügige Auswirkungen unterschiedlicher AQ-Abstände auf die Geschwindigkeiten und deren Standardabweichung festgestellt werden. Unter Variation der MQ-AQ-Zuordnung zeigte sich, dass im Fall einer Stauwarnung eine Lage des MQ stromabwärts des AQ sinnvoll ist, um die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten deutlich und die Anzahl von Situationen mit einer TTC < 2 s geringfügig zu reduzieren. Für das Harmonisierungsszenario ist die Lage des MQ zum AQ von geringerer Bedeutung. Eine Positionierung des MQ stromaufwärts des AQ führte jedoch auf zweistreifigen Strecken zu einzelnen Ausreißern, bei denen die Standardabweichung der Geschwindigkeiten deutlich zunahm und der Verkehr unruhiger wurde.

3.3 Wirkungsfeldanalyse von Stauwarnungen

Je dichter die MQ und AQ einer SBA auf einer von regelmäßigen Staus betroffenen Strecke installiert sind, desto schneller und ortspräziser kann ein Stauereignis detektiert und angezeigt werden, um Verkehrsteilnehmende im Zulauf zum Stauende zu warnen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass eine angezeigte Warnung unabhängig von der Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen eine Wirkung bei den

gewarnten Verkehrsteilnehmenden erreicht, zum Beispiel in Form von gesteigerter Aufmerksamkeit oder Bremsbereitschaft. Zur Ermittlung des Wirkungsfelds von Stauendewarnungen wurde ein theoretisches Modell entwickelt, mit dem die Anzahl der vor einem Stauende gewarnten Fahrzeuge in Abhängigkeit vom AQ- und MQ-Abstand sowie der Verkehrsbelastung geschätzt werden kann. Dies stellt ein ergänzendes Verfahren zur Beurteilung der Verkehrssicherheitswirkung von SBA dar, da neben der reinen Warnwirkung zum Beispiel auch die Geschwindigkeit, mit der sich ein Fahrzeug auf das Stauende zubewegt, von großer Bedeutung für das Unfallrisiko und damit den Wirkgrad einer SBA ist. Das Modell basiert auf verkehrsflusstheoretischen Ansätzen, welche mit der grundsätzlichen Funktionsweise einer SBA kombiniert werden.

Das Modell geht dabei von einer idealisierten Gleichverteilung der Stauentstehung zwischen zwei MQ aus. Es kann auch durch die Annahme einer weitgehend gleichmäßigen Verteilung von MQ und AQ von der Praxis abweichen, weil an Abschnitten mit einer hohen Knotenpunktdichte und/oder streckengeometrischen Zwangspunkten die MQ/AQ-Abstände in der Praxis mitunter deutlich variieren.

Bei Anwendung des Modells zeigte sich, dass die Anzahl der nicht gewarnten Fahrzeuge stärker vom MQ-Abstand als vom AQ-Abstand abhängt. Die Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge kann demnach vor allem durch die Reduktion der MQ-Abstände verringert werden. Eine durchgeführte varianzbasierte Sensitivitätsanalyse bestätigte dies: Während die Variation der Verkehrsstärke zwischen 2 000 und 6 000 Kfz/h erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Anzahl nicht gewarnter Fahrzeuge hat, wurde für einen MQ-Abstand zwischen 500 und 2 500 m ein deutlich größerer Einfluss auf das Ergebnis festgestellt als für einen AQ-Abstand zwischen 500 und 2 500 m. Auch die Variation der Datenverarbeitungszeit der SBA zwischen 15 s und 3 min resultierte in einem viermal so großen Einfluss auf die Anzahl der nicht vor dem Stau gewarnten Fahrzeuge wie die Variation des AQ-Abstands zwischen 500 und 2 500 m.

4 Fazit und Ausblick

Insgesamt konnten keine Wirkungsunterschiede hinsichtlich der Befolgung von SBA-Schaltungen bei unterschiedlichen AQ-Abständen nachgewiesen werden. Daher liefern die empirischen Analysen keine Indizien für einen zusätzlichen Nutzen geringer AQ-Abstände für den Verkehrsablauf. Aus den Ergebnissen der empirischen Analyse lassen sich daher keine von den bereits geltenden Vorgaben der RWVA (1997) abweichenden Empfehlungen für einen verkehrstechnisch sinnvollen AQ-Abstand ableiten.

Mittels einer Simulation stellte sich die Lage des MQ stromabwärts des zugehörigen AQ als verkehrstechnisch günstiger heraus als eine Lage des MQ auf gleicher Höhe oder stromaufwärts des AQ. Die Anordnung eines MQ wenige hundert Meter stromabwärts des zugehörigen AQ war früher gängige Praxis, als zur Verkehrsdetektion in der Regel Induktionsschleifen eingesetzt wurden. Der Einsatz von Überkopfsensoren ermöglicht diesen räumlichen Versatz jedoch nicht und erfordert in der Praxis eine entsprechende Berücksichtigung in der Konfiguration der SBA. Eine pauschale Empfehlung zum optimalen Abstand zwischen AQ und MQ in Regelwerken lässt sich somit nicht geben. Bisher sind keine Empfehlungen zum Abstand zwischen AQ und MQ in Regelwerken enthalten.

Die Anordnung der MQ und AQ hängt wesentlich von den örtlichen Gegebenheiten wie zum Beispiel der Lage von Einfahrten und der Übersichtlichkeit der Trassenführung ab. Eine hohe Anschlussstellendichte in Ballungsräumen, in denen SBA vorrangig zum Einsatz kommen, bedingt häufig eine hohe Dichte von MQ und AQ. Die Kenntnis regelmäßig aktivierter Engpässe (zum Beispiel im Bereich von Ausfahrten oder Steigungsstrecken) kann zur Unterstützung der Verkehrssicherheit und zur Aufrechterhaltung der Verkehrsqualität zusätzliche AQ und MQ aus verkehrstechnischer Sicht begründen. Andererseits sind bei der Planung von SBA Wirtschaftlichkeitsaspekte zu berücksichtigen. Das im Rahmen der Untersuchung entwickelte Modell zur Wirkfeldanalyse von Stauwarnungen deutet auf einen deutlich größeren Nutzen von geringen MQ-Abständen im Vergleich zu geringen AQ-Abständen hin. Es wird empfohlen, beim Neuentwurf oder Ausbau bestehender SBA den Fokus auf die Verdichtung von MQ zu legen. Bei größeren AQ-Abständen wird in den RWVZ (FGSV, 1997) bereits geraten, eine Verdichtung der MQ zu prüfen.

Ob ein kürzeres Messintervall die Reaktionszeit einer SBA verbessern kann, wurde nicht empirisch untersucht. Im Rahmen der Simulation wurde jedoch deutlich, dass die Konfiguration einer SBA für kleine Erfassungsintervalle angepasst werden muss. So müssen zur Erhaltung der Qualität der Verkehrszustandsbestimmung durch die verkürzten Intervalle entsprechende Glättungsmethoden angewendet werden. In der Praxis werden bereits 15 s-Intervalle ausgewertet, welche durch gleitende Mittelwertbildung geglättet werden.

Für die weitere Entwicklung der Verfahren für die Planung und Steuerung können fahrzeugseitig generierte Daten sowie Assistenzsysteme unter Nutzung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation die Funktionen der kollektiven Verkehrssteuerung ergänzen. Es empfiehlt sich daher die Untersuchung, ob und wie die Einbindung von FCD in die Verkehrszustandsdetektion möglich ist und ob damit ein vergleichbarer Effekt wie bei einer Verdichtung von MQ erreicht werden könnte. Mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge sollte untersucht werden, ob die Übertragung der WZ-Anzeigen von SBA in die Fahrzeuge die Wirkung von SBA verbessern kann.

Da eine Sicherheitswirkung von Gefahrenwarnungen durch erhöhte Aufmerksamkeit oder Bremsbereitschaft der Verkehrsteilnehmenden auch unabhängig von der Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen zu vermuten ist, werden weitergehende Untersuchungen zur Verkehrssicherheitswirkung von SBA empfohlen. Um die Ergebnisse der Untersuchung sinnvoll zu ergänzen, sollte der Untersuchungsschwerpunkt dabei auf der Analyse des Zusammenhangs zwischen AQ-Abständen und Unfallkenngrößen von SBA-gesteuerten Streckenabschnitten liegen.