

Auswirkungen kooperativer Systeme und autonomen/hochautomatisierten Fahrens auf den Verkehrsablauf und Anforderungen an die kollektive Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen

FA 3.538

Forschungsstellen: Heusch/Boesefeldt GmbH, Aachen
 Ingenieurbüro Schwietering, Aachen
 Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden
 Technische Universität Dresden, Institut für Automobiltechnik (Prof. Dr.-Ing. B. Bäker)

Bearbeiter: Schwietering, C./Haug, A./Grimm, J./Hilgers, T./Krabbe, A./Kutter, S./Temeplhahn, C./Füg, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2020

1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Um die stetig weiter ansteigende Verkehrsleistung auf den Autobahnen in einer akzeptablen Verkehrsqualität abwickeln zu können, werden Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eingesetzt, die sich an den Vorgaben des Merkblatts für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 99) orientieren. Das darin definierte Steuerungsmodell wurde für die damals herrschenden Verkehrsverhältnisse, die technischen Möglichkeiten der Sensorik, Aktorik und Übertragungstechniken, die gültigen gesetzlichen Vorgaben sowie die Fahrzeugmerkmale konzipiert. Die heute eingesetzten VBA, aber auch die aktuellen Steuerungsmodellkonzepte sind nicht darauf ausgelegt, den mittlerweile erreichten technischen Fortschritt angemessen zu berücksichtigen. Das MARZ 2018 berücksichtigt Teile davon, eine SBA-Umsetzung nach MARZ 2018 ist bisher jedoch noch nicht erfolgt. Dabei ist zu erwarten, dass sich insbesondere Fahrerassistenzsysteme bis hin zu hochautomatisierten beziehungsweise autonomen Fahrzeugen signifikant auf den Verkehrsablauf auswirken werden und dies weitreichende Folgen auf die Zweckmäßigkeit und Wirkung bislang eingesetzter Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen haben kann.

Ziel dieses Forschungsprojekts war es, die Auswirkungen von hochautomatisierten Fahrzeugen auf die SBA-Steuerung zu untersuchen und mögliche Anpassungen des Steuerungsmodells zu erarbeiten. Darüber hinaus sollten gemeinsam mit den im Projekt beteiligten Straßenbetreibern Anforderungen an das Fahrzeugsteuerungsverhalten von automatisierten Fahrzeugen definiert werden mit dem Ziel, den Verkehrsablauf aus Betreibersicht weiter zu verbessern.

2 Vorgehen

Aufbauend auf einer Literaturrecherche zum Stand der Technik bezüglich Fahrzeugautomatisierung und der Wirkung bestehender Verkehrsbeeinflussungsanlagen wurden zwei valide

mikroskopische Simulationsmodelle für Strecken in Bayern und NRW erstellt. Die Streckenabschnitte auf der A 57 und der A 92 sind beide mit SBA basierend auf dem Steuerungsverfahren nach MARZ 99 ausgestattet. Für beide Strecken wurden lokale erfasste Verkehrsdaten (aggregiert und Einzelfahrzeugdaten) sowie Umfelddaten und Schaltdaten bereitgestellt. Die Aufbereitung der Verkehrsdaten bildete die Grundlage für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells sowie für die Erstellung und die Kalibrierung eines Verhaltensmodells für die Reaktion nicht automatisierter Fahrzeuge auf SBA-Schaltungen. Die Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle erfolgte gemäß der "Hinweise für mikroskopische Verkehrsflussimulationen" nach der FGSV unter der Verwendung des Simulationstools AIMSUN NEXT (Vers. 8.4.1). Das auf Basis der Verkehrsdatenanalyse entwickelte Verhaltensmodell wurde in einem Wirkmodell mit Fahrsituationen verknüpft und die empirischen Zusammenhänge wurden für die menschlichen Fahrer auf der Basis von Einzelfahrzeugdaten und Schaltdaten kalibriert. Das Wirkmodell bildet somit die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die SBA-Maßnahmen ab.

Im Anschluss wurde die mikroskopische Verkehrsflussimulation an eine MARZ-konforme UZ mit den Originalparametern der jeweiligen Strecke angebunden, mittels derer SBA-Schaltungen für die Simulation ermittelt werden. Die Schaltungen werden in der Simulation umgesetzt und vom ebenfalls angebundenen Wirkmodell erkannt. Die damit verknüpften Verhaltensparameter werden wieder auf die in der Simulation abgebildeten Fahrerfahrzeugeinheiten angewendet. In der Simulation werden mittels des Wirkmodells das Verhalten der simulierten Fahrzeuge je nach Schaltbild, Verkehrssituation und Fahrzeugart (HAF beziehungsweise HAV oder menschlicher Fahrer) beeinflusst. Eine schematische Skizze des Vorgehens ist in Bild 1 dargestellt.

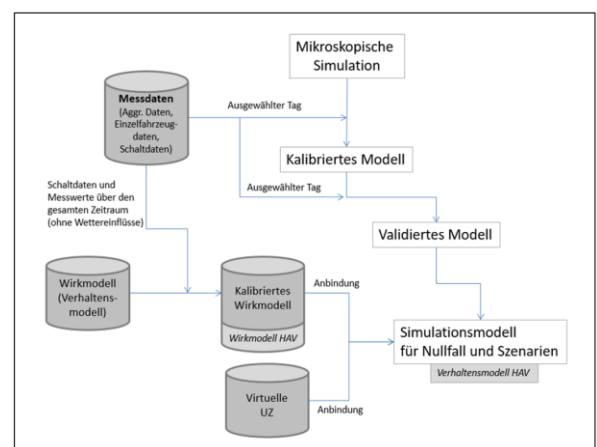


Bild 1: Vorgehen Erstellung Simulationsmodell

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens bestand zudem darin, ein Fahrverhaltensmodell für automatisierte Fahrzeuge zu formulieren, mit dem ein aus Sicht von Straßenbetreibern beziehungsweise Betreibern von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) wünschenswertes Fahrverhalten entsteht. Dies schließt insbesondere ein, dass automatisierte Fahrzeuge durch ihr individuelles Verhalten zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit, einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit und einer Verstärkung des Verkehrsflusses beitragen – die bereits heute beobachtbaren gewünschten Wirkungen von SBA sollen somit unterstützt, zusätzliche negative Wirkungen dagegen vermieden werden.

Gemeinsam mit dem Betreuerkreis wurden vom Konsortium Anforderungen an die automatisierte Fahrzeugsteuerung aus der Perspektive der Betreiber von SBA aufgestellt und in ein Fahrverhaltensmodell überführt.

Um die Wirkungen und Einflüsse automatisierten Fahrens differenzierter bewerten zu können, wurde entschieden, neben dem aus Betreibersicht wünschenswertem Modell zwei weitere Ausprägungen automatisierten Fahrens zu definieren und als Referenzfälle in der Simulation abzubilden:

- 1 Eine konservative Fahrzeugsteuerung bildet eine im Vergleich zum wünschenswertem Modell sehr defensive und dadurch auch eher reaktive (das heißt weniger vorausschauende) Fahrweise ab. Es werden zum Beispiel größere Weg- und Zeitlücken zu Vorfahrenden eingehalten. Die Einhaltung der Mindestzeitlücken ist jedoch sehr strikt, sodass Verzögerungen der Vorfahrenden unmittelbar nachvollzogen werden, gegebenenfalls auch mit stärkeren Verzögerungen.
- 2 Eine progressive Fahrzeugsteuerung bildet im Gegensatz dazu eine Fahrweise an der Grenze der für automatisierte Fahrzeuge unterstellten technischen und praktischen Machbarkeit unter Beachtung aller zwingenden Anforderungen ab. Diese Fahrweise ist insbesondere durch eine Toleranz relativ kurzer Weg- und Zeitlücken gekennzeichnet, die grundsätzlich eine positive Wirkung hinsichtlich Kapazität und Leistungsfähigkeit bieten könnte. Hierdurch besteht bei Verzögerung der Vorfahrenden wenig Handlungsspielraum, sodass auch hier gegebenenfalls mit starken Verzögerungen reagiert werden muss.

Das aus Betreibersicht wünschenswerteste Modell der Fahrzeugsteuerung bildet demgegenüber eine vorausschauende Fahrweise unter Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen ab. Diese ist insbesondere auch durch ein Abstandsverhalten mit ausreichendem Spielraum zur Kompensation von Störeinflüssen (zum Beispiel Stauwellen) gekennzeichnet, der im Gegensatz zur konservativen Fahrzeugsteuerung im Bedarfsfall auch ausgenutzt werden kann.

Die Fahrverhaltensmodelle wurden in der Simulation umgesetzt und die Auswirkungen für die verschiedenen Durchdrin-

gungsraten und Fahrverhaltensmodelle mit dem Nullfall (nur menschliche Fahrer) verglichen. Basierend auf den Auswertungen wurden Anforderungen an das Fahrverhalten von HAF sowie Anpassungen und Erweiterungen der SBA-Steuerung diskutiert. Es wurden Handlungsempfehlungen, die sich aus den einzelnen Maßnahmen für den Betrieb und die Steuerung von SBA und für die automatisierte Fahrzeugsteuerung ergeben, ermittelt und in einen zeitlichen Bezug gebracht.

3 Simulationsszenarien und Ergebnisse

3.1 Simulationsszenarien

Unter Berücksichtigung aller Simulationsrandbedingungen wurden die folgenden Szenarien für beide Streckenabschnitte simuliert:

- 1 Geschwindigkeitsbegrenzung auf 130 km/h (A 92) beziehungsweise 120 km/h (A 57),
- 2 Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h,
- 3 Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h,
- 4 Geschwindigkeitsbegrenzung auf 60 km/h (Stauabsicherung).

Es wurde festgelegt, dass in einem Simulationsszenario nur jeweils automatisierte Fahrzeuge einer dieser drei Ausprägungen eingesetzt werden. Eine Mischung mehrerer Ausprägungen im gleichen Simulationsszenario würde die Zuordnung und Bewertung von Wirkungen automatisierten Fahrens erschweren. Die drei Ausprägungen werden daher in separaten Simulationsszenarien abgebildet. Für alle Fahrverhaltensmodelle werden verschiedene Ausprägungen simuliert und untersucht. Zusätzlich zum Nullfall, mit nur menschlichen Fahrern, und der 100%-Ausstattung wurden Mischszenarien mit 10, 50 und 90 % simuliert.

Zur Auswertung der Simulationen wurden verschiedene Kenngrößen, die das Abstandsverhalten, den Verkehrsfluss und das Geschwindigkeitsverhalten beschreiben angewandt. Die Daten werden aus der Simulation herausgeschrieben und beinhalten sowohl Einzelfahrzeugdaten als auch abschnitts- und querschnittsbezogene Daten.

3.2 Simulationsergebnisse

Von den drei Fahrverhaltensmodellen der HAF können das progressive und das wünschenswerteste Modell als zielführend angesehen werden. Das konservative Modell führte ab einer Ausstattungsrate von 50 % zu einer deutlich verringerten Streckenkapazität um ca. 1000 Kfz/h im zweistreifigen Bereich gegenüber den menschlichen Fahrern und wurde daher nicht weiter analysiert.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Ausschaltkriterien einer Harmonisierungsschaltung bei einem hohen HAF-Anteil nicht erreicht werden. Für die Szenarien mit 90 und 100 % HAV wurde verkehrsbedingt relativ zügig eine Schaltung von 80 km/h aktiviert, die bis zum Ende der Simulation Bestand hatte. Der

Grund dafür liegt in der parametrisierten Ausschaltsschwelle. Die Schaltung wird bei einer mittleren lokalen Geschwindigkeit > 80 km/h deaktiviert. Da die automatisierten Fahrzeuge aber die Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h nicht überschreiten, ist eine Deaktivierung nur mit menschlichen Fahrern möglich. Daher wurde bei der Betrachtung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluss auf der A 57 hauptsächlich dieser Schaltzustand analysiert.

Insgesamt wird der Verkehrsfluss für beide Fahrverhaltensmodelle der HAF bei steigendem Ausstattungsgrad aufgrund der Parameter der Modelle deutlich homogenisiert und damit verbessert. Bei einer Ausstattung von 100 % ist dies zum einen daran erkennbar, dass es keine Stauschaltungen und auch keine Zusammenbrüche, nach den beschriebenen Kriterien, gibt. Zum anderen nimmt das Geschwindigkeitsniveau bei hoher Dichte ebenfalls zu. Für die Szenarien mit 100 % HAF ist eine deutliche Kapazitätserhöhung erkennbar, sodass bereits ohne Einbrüche Kapazitätssteigerungen von mindestens 800 Kfz/h im progressiven Modell und ca. 300 Kfz/h im wünschenswerten Modell erreicht werden. Für eine genaue Kapazitätsermittlung sind weitere Simulationen, bei denen Verkehrszusammenbrüche enthalten sind, nötig.

Eine Kapazitätserhöhung wird bereits ab einem Ausstattungsgrad von 50 % erkennbar, es kommt aber je nach Querschnitt und Modell noch zu Einbrüchen, daher sind die Erhöhungen kleiner. Als Hauptgrund für die Kapazitätserhöhungen und die damit verbundenen höheren Dichten sind die geringeren Zeitlücken bei gleichzeitig relativ hohen Geschwindigkeiten (80 km/h) zu sehen, die für die verschiedenen Fahrverhaltensmodelle der HAF eingestellt werden.

Im progressiven und wünschenswerten Modell sind mittlere Abstände zwischen den Fahrzeugen von ca. 20 m bei Geschwindigkeiten von ca. 80 km/h zu beobachten. Die in der Simulation maximal erreichte Dichte von 45 FZ/km/Fahrfahrbahn führt zu sehr geringen Zeitlücken von 0,775 s bei 80 km/h. Dies liegt unter dem in [VDA17] und als komfortabel beschriebenen Abstand und unter der in der ISO 22179 definierten Mindestzeitlücke.

Auch wenn die geringen Zeitlücken nicht die gesamte Strecke gefahren werden, sondern durch gewisse Situationen (zum Beispiel Spurwechsel) bedingt werden, können die insgesamt geringeren Abstände auch zu Problemen führen. An Anschlussstellen wird beispielsweise das Einfahren auf die Hauptfahrbahn deutlich erschwert. In der Simulation kann mit dem gewählten Fahrverhalten die aktuelle Nachfrage auf den Strecken bedient werden. Die Dichte kann allerdings nicht beliebig erhöht werden, da das System irgendwann zusammenbrechen wird. Aus diesem Grund wird weiterhin der Bedarf für Streckenbeeinflussungsanlagen vorhanden sein.

Die mittlere Reisezeit nimmt für beide Fahrverhaltensmodelle auf der A 57 um ca. 35 s ab (mehr als 4 %), was ebenfalls in der Homogenisierung des Verkehrsablaufs begründet liegt. Auf der

A 92 kann nur für das progressive Modell eine Verbesserung der Reisezeit erreicht werden, allerdings waren im Nullfall keine Störungen vorhanden. Im progressiven Fahrverhaltensmodell ist insbesondere für die Mischszenarien von 50 und 90 % das Geschwindigkeitsniveau höher als im wünschenswerten Modell. Das Niveau und der Median sind im 100 %-Szenario für beide Modelle ähnlich. Der Median ist zudem ähnlich der menschlichen Fahrer, allerdings ist die Streuung deutlich geringer, da die automatisierten Fahrzeuge annähernd die gleiche Wunschgeschwindigkeit haben. Im progressiven Modell ist die Streuung für 100 % HAF größer als im wünschenswerten Fahrverhaltensmodell. Die Standardabweichung der Geschwindigkeit ist bei hoher Verkehrsnachfrage im progressiven Modell größer, da die HAF später und stärker auf das vorausfahrende Fahrzeug und Störungen reagieren. Dadurch sind die Geschwindigkeiten nicht so homogen wie im wünschenswerten Modell, in dem die Fahrzeuge weniger offensiv reagieren. Während es für die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen keine modellbezogenen Unterschiede gibt, ist die Streuung der Geschwindigkeitsdifferenzen zum Vorderfahrzeug im progressiven Modell größer, was ebenfalls auf die Verzögerung und die möglichen Abstände zum Vorderfahrzeug zurückzuführen ist. Der Anteil an Zeitlücken von 0-0,75 s ist aufgrund der weniger vorausschauenden Reaktion der progressiven HAF im 100 %-Szenario in diesem Modell größer. Das CIBTR ist für beide Modelle ähnlich. Insgesamt sind für beide Modelle die 100 %-Ergebnisse in ihrem Median ähnlich. Allerdings fahren die Fahrzeuge im wünschenswerten Modell etwas vorausschauender und homogener aufgrund der nicht ganz so starken Wunschverzögerung, sodass die Streuungen im wünschenswerten Modell kleiner sind.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich durch die Einführung von HAF, je nach Parametereinstellungen im Modell, sowohl eine positive als auch eine negative Wirkung hinsichtlich der Kapazität ergeben kann. Einen wesentlichen Einfluss auf die Dichte haben die Zeitlücken, deren Veränderungen kritisch betrachtet werden müssen, da sie unter Umständen an der Grenze des praktisch Machbaren liegen und die Sicherheit nicht mehr gewährleistet werden kann. Zudem ist festzuhalten, dass automatisierte Fahrzeuge mit dem angenommenen Fahrverhalten nicht gut mit der vorhandenen SBA-Steuerung harmonisieren, da Harmonisierungsschaltungen zum Teil nicht aufgelöst werden, obwohl aufgrund der Verkehrslage eine Rücknahme der Schaltung angemessen wäre.

4 Handlungsempfehlungen und Maßnahmen

Ziel des Forschungsprojekts war es auszuarbeiten, welche Anpassungen an der Steuerung von SBA bezüglich der zukünftigen Szenarien von automatisiertem Fahren sinnvoll beziehungsweise notwendig sein werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass mit einer SBA im Wesentlichen die Harmonisierung des Verkehrsablaufs zur Stauvermeidung und die Warnung der Verkehrsteilnehmer vor gefährlichen Situationen erzielt wer-

den soll. Trotz der bei hohen Ausstattungsraten mit einheitlichem Fahrverhalten festzustellenden Homogenisierung des Verkehrsablaufs wird davon ausgegangen, dass der Harmonisierungswirkung der SBA auch mit automatisierten Fahrzeugen weiterhin eine wichtige Rolle zukommt. Zum einen werden über einen langen Zeitraum Mischszenarien eintreten, in denen die unterschiedlichen Verhaltensweisen von automatisiert und nicht automatisiert fahrenden Verkehrsteilnehmern zu Störungen im Verkehrsablauf führen können. Zum anderen werden auch bei hohen Ausstattungsraten für automatisierte Fahrzeuge keine idealisierten Verhältnisse, mit einheitlichem Fahrverhalten wie es in der Simulation der Fall war, eintreten. Auch die Verhaltensparameter der automatisierten Fahrzeuge werden in

gewissen Grenzen variieren, sodass ebenfalls ein Harmonisierungspotenzial durch SBA vorhanden ist. Darüber hinaus kann den zukünftigen SBA auch die gezielte Beeinflussung der automatisierten Fahrzeuge zukommen, um die negativen Auswirkungen von eingetretenen Störungssituationen zu verringern und beispielsweise eine zügigere Stauausfahrt zu unterstützen oder kapazitätsbedingte Störungen durch Verminderung oder zeitliche Verzögerung des Zuflusses zu entschärfen. In folgender Tabelle werden aufbauend auf den Simulationsergebnissen und auf dem Austausch mit den Betreibern von SBA mögliche Erweiterungen der SBA-Steuerung und darüberhinausgehende Maßnahmen aufgeführt.

	Maßnahme auf Seite der SBA oder HAF	Erwartete Wirkung	Maßnahme auf Seite der SBA oder HAF
1a	Prüfung und Optimierung der AQ/MQ-Zuordnung	Vermeidung von Fehlschaltungen oder Verharren in einzelnen Schaltungen	Gering – mittel, je nach Umsetzung in Zentrale
1b	Anpassung der Ein- und Ausschalt-schwellwerte (Geschwindigkeit, Q_b , Dichte)	Auflösen von Harmonisierungsschaltungen möglich Zeitlich verzögerte Reaktion der SBA bei niedrigeren Schwellwerten, da mit der Absenkung der Ausschalt-schwellen auch die Einschalt-schwellen gesenkt werden müssen	Gering
2	Anderer Steuerungsalgorithmus (nicht schwellwertbasiert)	Präventiver und im Störfall aktivierender Algorithmus, der situative Fahrstrategien anordnet Frühere Reaktion auf Verkehrszustand als bei schwellwert-basierten Verfahren möglicher Einbindung von kooperativen Systemen in Situationserfassung und Maßnahmenauswahl möglich	Mittel – groß Neue Verfahren müssen konzipiert, getestet und Software-technisch umgesetzt werden.
3	Nutzung von fahrzeugseitig generierten Daten in der Steuerung	Zeitlich frühere Detektion von Ereignissen Genauere Lokalisierung von Ereignissen bei spurgenaue-r Meldung Ergänzung der lokalen Detektion, bei hohen Ausstattungsraten auch Ersatz der statischen Detektion (Ersatz der stati-schen Detektion nur mit neuen Steuerungs-algorithmen möglich, die keine Vollerfassung voraussetzen)	Groß MARZ 2018 sieht die Verkehrslageermittlung aus strecken-bezogenen Daten vor, die Umsetzung muss aber noch definiert werden. Standardisierung der Datenübertragung und Datennutzung nötig
4	Übermittlung von Fahrstrategien für ausgewählte Verkehrssituationen: <ul style="list-style-type: none"> Zufahrt auf hochbelastete Abschnitte/Verflechtungs-strecken Stauausfahrt "Gafferstau" Rettungsgassen Unfallstellen wenn Spurgetreues Fahren nicht mehr möglich ist	Effizienteres Nutzen der Kapazität (Systemoptimum) Weniger gefährliche Situationen Weniger Unfälle/Zusammenbrüche Sicheres Vorbeileiten an gefährlichen Situationen	Groß Optimale Strategie/Verhalten in den einzelnen Situationen muss erst ermittelt und planerisch versorgt werden Rechtliche Situation muss Übermittlung von Fahrstrategien gewährleisten Rechtliche Situation der Haftung ist zu klären Strategien können als Empfehlung gesehen werden, Haftung und Übernahme der Strategie obliegt dem HAF
5	Festlegung von Anforderungen an das Fahrverhalten automatisierter Fahr-zeuge	Vermeidung von Kapazitätsminderungen	Mittel Rechtliche Umsetzung über Zulassung und StVO

5 Fazit

Es wurden zwei valide Simulationsmodelle erstellt. An die Si-mulationsmodelle wurde eine Nachbildung der dortigen UZ mit den Originalparametern angebunden. Zusätzlich wurde ein Wirkmodell aus Realdaten entwickelt und angebunden. Das Wirkmodell bildet die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die SBA-Maßnahmen ab. Die HAF-Fahrzeuge wurden mit drei ver-schiedenen Fahrverhaltensmodellen (konservativ / aus Betrei-

bersicht wünschenswert / progressiv) in der Simulation abge-bildet, die sich im Abstandsverhalten, dem Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten und der Reaktionsempfindlichkeit auf die umgebenden Fahrzeuge unterscheiden. Für alle Verhal-tenmodelle wurden Szenarien mit verschiedenen Ausstat-tungsraten modelliert und analysiert. Je nach Fahrverhaltens-modellen stellten sich bei hohen Ausstattungsraten von HAF

Verbesserungen oder auch Verschlechterungen in Bezug auf die Streckenkapazität ein.

Mit dem konservativen Verhalten konnte bereits ab einer Ausstattung von 50 % HAF die heutige Verkehrsnachfrage auf den Streckenabschnitten nicht abgewickelt werden. Mit dem aus Betreibersicht wünschenswerten und dem progressiven Fahrverhalten wurden bei einer Ausstattung von 90 % HAF Kapazitätssteigerungen festgestellt. Im aus Betreibersicht wünschenswerten Modell, für das die Parameter gemeinsam mit den Betreibern definiert wurden, ist dabei das Fahrverhalten weniger aggressiv und dadurch komfortabler für die Nutzer als im progressiven Modell. Die Kapazitätssteigerungen sind mit einem homogenen Verkehrsfluss bei gleichzeitig geringen Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen verbunden. Die Abstände werden geringer als derzeit in der StVO erlaubt. Hier ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen dem technisch Möglichen, einem für den Nutzer komfortablen und einem aus rechtlicher Sicht durchführbaren Weg zu finden.

Da die Simulation der HAF jeweils mit nur einem Fahrverhaltensmodell durchgeführt wurde, waren das Verhalten bezüglich der Geschwindigkeit, der Differenzen zum Folgefahrzeug und zum Nachbarfahrstreifen sowie die Standardabweichungen sehr homogen. Dadurch konnten im Zusammenspiel mit der SBA Zusammenbrüche vermieden und die Reisezeiten verbessert werden. Als nächster Schritt sollte untersucht werden, inwieweit sich diese Ergebnisse bei einer Durchmischung der Fahrverhaltensmodelle, wie sie auch in der Realität stattfinden wird, bestätigen.

In der SBA konnte bei steigender Durchdringung ein Verharren in der 80 km/h-Harmonisierungsschaltung beobachtet werden, das auf die Ein- und Ausschaltenschwellwerte des MARZ 99 sowie die MQ/AQ-Zuordnung zurückzuführen ist. Mit steigender Durchdringung von HAF müssen mindestens die Schwellwerte überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Als zielführender wird aber die Entwicklung neuer, nicht schwellwertbasierter Steuerungsalgorithmen angesehen. Mit diesen könnte dann in Verkehrskollektiven mit einem wesentlichen HAF-Anteil dynamisch auf Ereignisse reagiert und diese gegebenenfalls sogar prädiktiv beeinflusst werden. Des Weiteren kann unter Nutzung der Fahrzeug-Infrastrukturkommunikation mittels SBA die gezielte Beeinflussung der automatisierten Fahrzeuge erfolgen, um die negativen Auswirkungen von eingetretenen Störungssituationen zu verringern. Auf diese Weise kann eine zügigere Stauausfahrt unterstützt oder die sicherere Zufahrt auf Störungen erfolgen. Bei der Detektion ausgewählter Situationen und der dafür zu entwickelnden optimalen Fahrstrategien besteht weiterer Forschungsbedarf.

Generell wird auch mit Einführung von HAF ein Bedarf an SBA gesehen. Es wird davon ausgegangen, dass selbst bei hohen Ausstattungsraten die Harmonisierungswirkung der SBA weiterhin wichtig und notwendig ist, da zum einen in Mischszenarien die unterschiedlichen Verhaltensweisen von automatisiert

und nicht automatisiert fahrenden Verkehrsteilnehmern zu Störungen im Verkehrsablauf führen können. Zum anderen werden auch Unterschiede in den Verhaltensparametern der automatisierten Fahrzeuge auftreten, sodass im Verkehrsablauf ebenfalls ein Harmonisierungspotenzial besteht. Zusätzlich werden sich die Aufgaben der SBA mit zunehmendem HAF-Anteil ändern. Der Fokus wird vielmehr auf der Situationserkennung und einer damit verbundenen Fahrstrategie, die entweder direkt in das Fahrzeug übertragen oder von dem HAF gewählt wird, liegen.