

## Aktualisierung der Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit LSA

FA 3.569

Forschungsstellen: IGS Ingenieurgesellschaft Stolz mbH,  
Neuss  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für  
Verkehrswesen – Planung u. Management  
(Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeldt)

Bearbeiter: Geistefeldt, J. / Vieten, M. / Wu, N. /  
Schmitz, J. / Stephan, N.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digi-  
tale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Januar 2023

- Durchführung einer HBS-konformen Simulation des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit LSA.

Ziel dieses Forschungsprojekts war die Weiterentwicklung und Ergänzung des Berechnungsverfahrens des HBS 2015 im Hinblick auf die oben genannten Aspekte. Dazu wurden umfangreiche Verkehrsmessungen mit unterschiedlichen Messverfahren an Knotenpunkten mit LSA in Deutschland durchgeführt. Neben der Auswertung der empirischen Daten wurden zusätzlich Verkehrsflusssimulationen eingesetzt, um die Datengrundlage zu erweitern. Durch die Aktualisierung des Berechnungsverfahrens sowie die erarbeiteten Hinweise wurde das Verfahren an den aktuellen Verkehrsablauf an Knotenpunkten mit LSA in Deutschland angepasst und erweitert, um eine genauere Bewertung der Verkehrsqualität zu erreichen.

### 1 Aufgabenstellung

Lichtsignalanlagen (LSA) stellen eine sichere und leistungsfähige Steuerungsform für inner- und außerorts gelegene Knotenpunkte dar. Der Verkehrsablauf wird durch die regelmäßigen oder auch unregelmäßigen Sperrungen und Freigaben einzelner Knotenpunktströme direkt beeinflusst, sodass für einzelne Verkehrsteilnehmer Wartezeiten entstehen können. Für eine sachgemäße Planung einer LSA ist es daher von besonderer Bedeutung, die genauen Auswirkungen auf die Qualität des Verkehrsablaufs abschätzen und bewerten zu können. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015; FGSV, 2015) enthält ein vollständiges Bewertungsverfahren, um die Qualität des Verkehrsablaufs an einem festzeitgesteuerten Einzelknotenpunkt oder einer Folge von koordiniert gesteuerten LSA aus Nutzersicht zu ermitteln. Das Verfahren wurde im Vergleich zur vorherigen Ausgabe des HBS (FGSV, 2001) in Teilen komplett überarbeitet und an neue Forschungserkenntnisse angepasst.

Bei der Anwendung des HBS 2015 zeigte sich jedoch, dass trotz der erfolgten Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens für Knotenpunkte mit LSA einige Teilkomponenten des Verfahrens einer Neukalibrierung bedürfen und nicht alle Fahrstreifenkonstellationen, Randbedingungen sowie Steuerungsverfahren hinreichend genau betrachtet werden können. Dies betrifft im Einzelnen folgende Aspekte:

- Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärken,
- Bestimmung des Einflusses des querenden Fuß- und Radverkehrs auf bedingt verträglich geführte Abbiegeströme,
- Berücksichtigung von Wechselwirkungen in Bezug auf die Kapazität von Fahrstreifen mit zusätzlichem kurzem Aufstellstreifen,
- Bewertung von Knotenpunkten mit verkehrsabhängig gesteuerten LSA,

### 2 Untersuchungsmethodik

Für die Untersuchung der unterschiedlichen Problemstellungen wurden verschiedene Erhebungsverfahren und Untersuchungsmethoden verwendet. Die mittlere Sättigungsverkehrsstärke beziehungsweise der mittlere Zeitbedarfwert wurde an 50 einzelnen Fahrstreifen mit unterschiedlichen Längsneigungen, Fahrstreifenbreiten, Abbiegeradien und zulässigen Höchstgeschwindigkeiten gemessen. Im Kollektiv waren insgesamt 14 Mischfahrstreifen enthalten. Mit einer Zeitstempelerfassung wurden der Überfahrtzeitpunkt und Fahrzeugtyp jedes einzelnen Fahrzeugs an den Haltlinien erfasst, sodass diese Informationen mikroskopisch mit dem Zeitlückenverfahren ausgewertet und die Sättigungsverkehrsstärke, die relevanten Einflussgrößen sowie die effektive Freigabezeit bestimmt werden konnten.

Da es bei der Ermittlung der Belegungszeit an Fußgänger- und Radfurten in der Vergangenheit mehrere unterschiedliche Auffassungen dieser Kenngröße und ihrer Erhebung gegeben hat, wurde die Belegungszeit zunächst gemäß dem HBS 2015 (FGSV, 2015) als die Freigabezeit des Fuß- und Radverkehrsstroms, während der die Fußgänger und Radfahrer den abbiegenden Kfz-Verkehrsstrom tatsächlich behindern, definiert. Die Belegungszeit wurde an insgesamt zwölf Furten erhoben. Die Auswertungsmethodik wurde analog zur Studie von TARKO und GACA (1991), die der Belegungszeit im HBS 2015 zugrunde liegt, gewählt. Dabei wurde die Zeit je Umlauf gemessen, in der eine definierte Belegungsfläche durch mindestens einen Fußgänger oder Radfahrer belegt war. Die Belegungsfläche wurde nach KRAUS und TRAPP (1986) als die unmittelbare Konfliktfläche (mit einer Breite von 2 m) zzgl. Sicherheitszuschlägen vor und hinter der Konfliktfläche, welche zunächst empirisch ermittelt wurden, angesetzt. Die Belegungszeit konnte dann durch die Verrechnung der einzeln bestimmten Gehgeschwindigkeiten der Fußgänger und der zugrunde gelegten Belegungsfläche berechnet werden. Da empirisch nur eine begrenzte Anzahl an Randbedingungen beobachtet werden konnte,

wurden die Messdaten durch mikroskopische Verkehrsflussimulationen mit dem Programm PTV Vissim erweitert.

Die Ermittlung von Kapazitäten von kurzen Aufstellstreifen konnte nicht empirisch durchgeführt werden, da eine Rückstaubildung oftmals nur in wenigen Umläufen am Tag auftritt und gleiche Verkehrsbedingungen kaum beobachtet werden können. Daher wurde für diesen Untersuchungsaspekt analog zu den dem HBS 2015 zugrundeliegenden Studien von WU (2003b, 2007 und 2008) umfangreiche Simulationen mit PTV Vissim durchgeführt. Zunächst wurde das Fahrverhalten an drei realen Knotenpunkten mit zusätzlichem kurzem Aufstellstreifen mittels eines Multicopters erhoben, um dieses möglichst genau in der Simulation abbilden zu können. Dabei wurde besonders das Umfahren des Rückstaus bei den Fahrstreifenkonstellationen mit mehr als einem durchgehenden Fahrstreifen beobachtet. In der Simulation wurden anschließend die Freigabezeiten der Abbiege- und Geradeausströme, die Anzahl der Aufstellplätze, die Anzahl der Geradeausfahrstreifen sowie die Form der Freigabe variiert, sodass insgesamt über 6 000 verschiedene Szenarien betrachtet wurden.

Die Analyse der Wartezeitverteilung an Knotenpunkten mit verkehrsabhängiger Steuerung im Vergleich zu einer Festzeitsteuerung erfolgte anhand weiterer Simulationen. Dazu wurden zunächst Fahrtzeiten an realen Knotenpunkten mit den Grundstellungen in einer Dauergrünphase der Hauptrichtung und in einer Alles-Rot-Phase erhoben und ausgewertet. Anschließend wurden mit PTV Vissim an drei Knotenpunkten verschiedene Belastungsszenarien untersucht. Dabei wurde der verkehrsabhängigen Steuerung jeweils das resultierende zweiphasige Festzeitprogramm, welches die mittleren Freigabe- und Sperrzeiten verwendet, gegenübergestellt.

Für die Ableitung von Anwendungshinweisen und Parametern für eine HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs mit dem Programm PTV Vissim wurden zunächst die standardmäßig eingestellten Parameter, welche oftmals in der Praxis verwendet werden, untersucht und mit den Ergebnissen der empirischen Erhebungen und den Randbedingungen des HBS verglichen. Durch die umfangreiche Datengrundlage konnten dabei die Aspekte der Sättigungsverkehrsstärke, der Instationarität und der Wartezeitermittlung betrachtet werden. Es wurden Parameter kalibriert, welche die HBS-Randbedingungen sowie die neuen abweichenden empirischen Erkenntnisse berücksichtigen. Die kalibrierten Parameter wurden anschließend in der Simulation von zehn realen Knotenpunkten validiert.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke zeigte, dass die Annahme einer Sättigungsverkehrsstärke von 2 000 Kfz/h beziehungsweise einem Zeitbedarfswert von 1,8 s im unbeeinflussten Pkw-Verkehr im HBS 2015 (FGSV, 2015), welche auf die Erhebungen von AHN (1987), AXHAUSEN et al. (1989) und SCHNABEL et al. (2005) zurückgeht, grundsätzlich bestätigt

werden kann. Im Mittel wurde an den insgesamt 17 Geradeausfahrstreifen für Pkw ein Zeitbedarfswert von 1,83 s gemessen. Auch die positionsabhängigen Zeitbedarfswerte wiesen den charakteristischen Verlauf auf. Dabei war der Zeitbedarfswert der ersten Position mit im Mittel 1,36 s relativ hoch, was möglicherweise mit der gestiegenen Verbreitung der Start-Stopp-Automatik in den Fahrzeugen begründet werden kann. Bei der Betrachtung geometrischer Einflussgrößen konnten Differenzen zum analytischen Bemessungsverfahren beobachtet werden. Die im HBS 2015 verwendeten Anpassungsfaktoren beruhen weitestgehend noch auf der Untersuchung von PAVEL (1974) und wurden teilweise nicht an deutschen Knotenpunkten gemessen, sondern aus mehreren Literaturquellen zusammengetragen. Die Steigung des Fahrstreifens zeigte in den Erhebungen einen deutlich geringeren Einfluss, was auch bereits in anderen Studien beobachtet wurde. Für Gefälle konnte kein Einfluss festgestellt werden, wobei hier nur ein Fahrstreifen betrachtet werden konnte. Auch der Einfluss des Abbiegeradius zeigte eine weniger starke Ausprägung als im HBS 2015 angenommen. Neben den geometrischen Einflussgrößen konnte auch ein Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeit festgestellt werden, welcher ebenfalls verkehrsflusstheoretisch zu begründen ist. Auf Fahrstreifen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h wurde eine geringere Sättigungsverkehrsstärke gemessen als an Fahrstreifen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 oder 70 km/h. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits von SCHLEICHER JESTER (1995) und BONNESON et al. (2006) dokumentiert. Für den Schwerverkehr wurden Pkw-Gleichwerte von 1,7 (statt bislang 1,75) für Lkw und Busse sowie 2,3 (statt bislang 2,5) für Lkw mit Anhänger und Sattel-Kfz und damit ein etwas geringerer Einfluss auf die Sättigungsverkehrsstärke als im HBS 2015 nach AHN (1987) ermittelt. Für die relevanten Einflussgrößen wurden anschließend die Anpassungsfaktoren aktualisiert oder neu hergeleitet. Bei der Ermittlung der effektiven Freigabezeit (im HBS 2015 "Abflusszeit" genannt) konnte der Zuschlag von einer Sekunde zur signalisierten Freigabezeit, der aus der Untersuchung von WOLFERMANN (2009) abgeleitet wurde, als pragmatische Näherung für ein Handrechenverfahren bestätigt werden.

Für die empirische Ermittlung der Belegungszeit wurden für querende Fußgänger zunächst Sicherheitszuschläge vor und hinter der unmittelbaren Konfliktfläche ermittelt. Dabei ergaben sich für die gleichgerichtet und entgegengerichtet querenden Fußgänger unterschiedliche Werte, wobei gleichgerichtet querende Fußgänger den abbiegenden Kfz-Verkehrsstrom länger behindern. Radfahrer, die in der Regel deutlich höhere Geschwindigkeiten als Fußgänger aufweisen, führten oftmals schon in einem Abstand von über 10 m vor der Konfliktfläche zum Anhalten der abbiegenden Fahrzeuge. Aus dem Stand anfahrende Radfahrer beeinflussten den abbiegenden Kfz-Verkehrsstrom durch die geringeren Geschwindigkeiten erst bei einem geringeren Abstand zur Konfliktfläche. Die mittlere Gehgeschwindigkeit der Fußgänger beim Queren der Furt lag bei 1,48 m/s mit einer Standardabweichung von 0,35 m/s. Bei der

Ermittlung der empirischen Belegungszeit wurde deutlich, dass die im HBS 2015 angegebene Funktion nach TARKO und GACA (1991) die Belegungszeiten tendenziell unterschätzt und relevante Randbedingungen nicht berücksichtigt. In der auf den empirischen Erhebungen aufbauenden Verkehrsflusssimulation konnten die Furtgeometrie, die Furtsignalisierung (simultan oder progressiv), die Freigabezeit und die Umlaufzeit (beziehungsweise der Freigabezeitanteil) als maßgebende Einflussgrößen ermittelt werden. Das in der Untersuchung abgeleitete Modell auf der Grundlage der Zeitlückentheorie berücksichtigt diese Parameter unmittelbar als Eingangsgrößen, wodurch die Belegungszeit deutlich genauer berechnet werden kann. Zudem wird die Belegungszeit der Radfahrer separat berechnet und so den vom Fußverkehr abweichenden Geschwindigkeiten Rechnung getragen. Der neu entwickelte Ansatz ist komplexer als die einfache Formulierung im HBS, sodass ebenfalls Approximationen abgeleitet wurden, welche für die Anwendung in einem Handrechenverfahren geeignet sind.

Bei der Beobachtung des Verkehrsablaufs an den Zufahrten mit zusätzlichem kurzem Aufstellstreifen und zwei durchgehenden Geradeausfahrstreifen wurde deutlich, dass bei einer Rückstauabildung vom Aufstellstreifen auf den angrenzenden Fahrstreifen die geradeausfahrenden Fahrzeuge diesen Rückstau im Regelfall über den weiteren Fahrstreifen umfahren. Dabei wechselten ca. 37 % der Fahrzeuge nach dem Umfahren wieder auf den stromaufwärts blockierten Fahrstreifen zurück. Auch wurde beobachtet, dass die am Knotenpunkt abbiegenden Fahrzeuge bereits in großer Entfernung von über 100 m zum Verzweigungspunkt auf den angrenzenden Fahrstreifen gewechselt sind. Zudem konnten vermehrt regelwidriges Fahrverhalten wie das Überfahren der Fahrstreifenbegrenzung sowie längere konfliktfreie Aufstelllängen als im HBS 2015 angenommen beobachtet werden. In der Simulation zeigte sich, dass die Kapazitäten mit dem im HBS 2015 verwendeten Berechnungsmodell nach WU (2003b, 2007 und 2008) zuverlässig geschätzt werden können und ein zweiter Fahrstreifen kaum von den Rückstauwirkungen beeinträchtigt wird. Die Lage der Freigabezeiten zueinander hat sowohl für die gleichzeitige Freigabe (Freigaben beginnen oder enden gleichzeitig) als auch die nicht gleichzeitige Freigabe (Freigabe des Aufstellstreifens unmittelbar vor oder nach der Freigabe der durchgehenden Fahrstreifen) keinen Einfluss auf die Kapazität. Das Modell ist somit für alle Fälle gültig. Mit den Simulationsergebnissen wurde das Modell erneut kalibriert, da in dieser Untersuchung eine deutlich größere Datengrundlage verwendet werden konnte. Die Berücksichtigung weiterer durchgehender Fahrstreifen wurde durch eine Ergänzung des Modells ermöglicht. Zudem wurden mehrere vereinfachte Modellansätze erprobt. Als geeignet stellte sich eine Erweiterung des Ansatzes aus BRILON et al. (1994) heraus, welcher trotz einer vergleichsweise einfachen Berechnung eine gute Anpassung an die simulierten Kapazitätswerte erreicht.

Die Analyse der mittleren Wartezeiten und Wartezeitverteilungen der einzelnen Verkehrsströme an Knotenpunkten mit verkehrsabhängig gesteuerter LSA, welche in eine Grundstellung mit einer Dauergrünphase der Hauptrichtung oder mit einer Alles-Rot-Phase schaltet, ergab bei mittleren bis hohen Auslastungen nur geringfügige Differenzen zu den unter gleichen Bedingungen auftretenden Wartezeiten an LSA mit Festzeitsteuerung, die jeweils die mittleren Freigabe- und Sperrzeiten berücksichtigt. Für diese einfachen verkehrsabhängigen Steuerungen stellt die Bewertung dieses Festzeitprogramms im ungesättigten Verkehrsfluss also eine gute Näherung dar. Auf der Grundlage der hier ermittelten Ergebnisse kann die Bewertung des Kfz-Verkehrs an LSA mit verkehrsabhängigen Steuerungen ebenfalls über die mittlere Wartezeit erfolgen, sodass allgemein keine angepassten Qualitätskriterien notwendig sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch den instationären Verkehrsfluss in der Realität gegebenenfalls größere Differenzen auftreten können. Bei komplexeren Schaltungen oder weiteren maßgeblichen Rand- und Umfeldbedingungen wie zum Beispiel einer unmittelbaren Abhängigkeit zu benachbarten Knotenpunkten oder einer ÖPNV-Bevorrechtigung, die in dieser Untersuchung nicht betrachtet wurden, können ebenfalls größere Abweichungen entstehen und es sollten alternative Verfahren verwendet werden.

Bei der mikroskopischen Simulation des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit LSA mit dem Programm PTV Vissim wurde festgestellt, dass unter Standardeinstellungen Differenzen zum Berechnungsverfahren des HBS 2015 auftreten. Über eine geeignete Implementierung der Verlustzeitmessung muss gewährleistet werden, dass in der Simulation gemäß der Definition der Wartezeit des HBS 2015 ausschließlich der Anteil der Verlustzeit bis zur Überfahrt der Haltlinie berücksichtigt wird. Zudem sinkt bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h der Zeitbedarfswert der abfließenden Fahrzeuge bei Standardeinstellungen auf 1,7 s ab, wodurch die Sättigungsverkehrsstärke ohne weitere Einflüsse um ca. 6 % höher ist als nach dem HBS. Die Sättigungsverkehrsstärke ist in PTV Vissim unmittelbar von der Fahrtgeschwindigkeit der Fahrzeuge und somit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängig, was den empirischen Ergebnissen dieser Untersuchung entspricht, jedoch im HBS 2015 bislang nicht berücksichtigt wird. Der Einfluss der Steigung unterscheidet sich ebenfalls von dem im HBS 2015 angegebenen Faktor, wobei der Einfluss in der Simulation deutlich geringer ist. Gefälle zeigte keinen Einfluss auf die Sättigungsverkehrsstärke. Der kapazitätsmindernde Einfluss der Fahrstreifenbreite kann in PTV Vissim nicht direkt berücksichtigt werden. Auch der Abbiegeradius hat zunächst keinen unmittelbaren Einfluss, sondern muss über geeignete Geschwindigkeitsverteilungen der Langsamfahrbereiche modelliert werden. Die mittlere Pkw-Aufstelllänge ist standardmäßig mit 6,37 m um ca. 6 % länger als im HBS 2015 angenommen. Insgesamt zeigte die Analyse, dass eine Bewertung der mit Standardeinstellungen simulierten Verlust- oder Wartezeiten mit den im HBS 2015 definierten Grenzwerten der Qualitätsstu-

fen des Verkehrsablaufs nicht zielführend ist, weil diese Simulationsergebnisse nicht vollständig konsistent mit den Randbedingungen des analytischen Bewertungsverfahrens sind.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden Anwendungshinweise und Parametereinstellungen für die Simulation des Verkehrsablaufs an LSA abgeleitet. Dabei wurden die Parameter und Annahmen des HBS 2015 zugrunde gelegt und die wesentlichen neuen empirischen Erkenntnisse der Untersuchung, wie die angepassten Faktoren für den Einfluss des Abbiegeradius und des Schwerverkehrs auf die Sättigungsverkehrsstärke, berücksichtigt. Darüber hinaus wurden Hinweise zur sachgemäßen Berücksichtigung der Instationarität innerhalb des Bemessungszeitraums gegeben, welche in der Simulation einen starken Einfluss auf die Ausprägung der resultierenden Wartezeit zeigte. Besonders die Ganglinien der Zuflussverkehrsstärke, die nicht der im HBS 2015 zugrunde liegenden Parabelform entsprechen, verursachten Abweichungen zum Berechnungsverfahren und sollten differenziert betrachtet werden. Für die Berücksichtigung der Instationarität sollte in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation die Wartezeit als gleitender Mittelwert einer Stunde über einen Zeitraum mit einer ausreichenden Vor- und Nachlaufzeit von mindestens 30 Minuten ermittelt werden. Durch die Verwendung der ermittelten Parameter und Anwendungshinweise konnte in der Validierung für zehn Knotenpunkte mit Festzeitsteuerung oder verkehrsabhängiger Steuerung für verschiedene Belastungsszenarien eine gute Übereinstimmung der aus der Simulation abgeleiteten Wartezeiten mit den nach dem HBS berechneten Werten erreicht werden, wobei mit steigender Auslastung zunehmende Abweichungen entstehen.

#### 4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den durchgeführten Untersuchungen folgende Empfehlungen für die Fortschreibung des HBS-Bemessungsverfahrens für Knotenpunkte mit LSA:

- Die Sättigungsverkehrsstärke eines Verkehrsstroms an einer LSA ohne weitere Einflussfaktoren von 2 000 Kfz/h sollte beibehalten werden, jedoch sind die Anpassungsfaktoren entsprechend der empirisch gewonnenen Erkenntnisse anzupassen. Dabei sollte auch ein Anpassungsfaktor zur sachgerechten Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit diskutiert werden.
- Das aktuell im HBS 2015 vorhandene Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Belegungszeit durch Fußgänger und Radfahrer sollte durch den in dieser Untersuchung entwickelten Ansatz ersetzt werden, da somit sämtliche Einflussgrößen direkt berücksichtigt und deutlich genauere Ergebnisse erreicht werden können. Es wird empfohlen, eine genaue Definition der Belegungszeit in das HBS und/oder die Begriffsbestimmungen aufzunehmen und wie im HBS 2001 den

Begriff "Blockierungszeit" zu verwenden, der eindeutiger ist und der englischen Bezeichnung "blockage time" entspricht.

- Das Verfahren des HBS 2015 zur Berechnung der Kapazität von kurzen Aufstellstreifen liefert grundsätzlich gute Ergebnisse und kann für Zufahrten mit zwei oder drei durchgehenden Fahrstreifen entsprechend der in dieser Untersuchung vorgeschlagenen Formulierung erweitert werden. Dabei sollten die neu kalibrierten Parameter verwendet werden. Alternativ kann auch eine der vorgeschlagenen Vereinfachungen implementiert werden.
- Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen mit PTV Vissim liefern unter Standardeinstellungen nur bedingt mit dem HBS 2015 vergleichbare Ergebnisse. Daher sollten simulierte Verlustzeiten nicht ohne weitere Kalibrierung mit den Grenzwerten der Wartezeit der Qualitätsstufen des HBS 2015 bewertet werden. Für zukünftige Simulationen, die eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des HBS anstreben oder als alternative Verfahren verwendet werden, sollten die hier abgeleiteten Anwendungshinweise und Parametereinstellungen genutzt werden.

Mit den vorgeschlagenen Erweiterungen und Anpassungen stellt das Bemessungsverfahren des HBS auch in Zukunft eine belastbare Grundlage für die Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit LSA dar. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich vor allem durch die bereits absehbaren Entwicklungen in der Fahrzeugtechnik, insbesondere hinsichtlich der Automatisierung von Fahrfunktionen, neuer Möglichkeiten der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation sowie der aus der zunehmenden Verbreitung elektrischer Antriebe resultierenden Änderung des Beschleunigungsverhaltens.