

---

# Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire

---

Sebastian Geyer<sup>1</sup>, Stephan Hakuli<sup>2</sup>, Hermann Winner<sup>3</sup>, Benjamin Franz<sup>4</sup>, Michaela Kauer<sup>5</sup>  
5. Tagung Fahrerassistenz  
15.-16. Mai 2012 in München

---

## **Technische Universität Darmstadt**

### **Fachgebiet Fahrzeugtechnik**

Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt:

<sup>1</sup>geyer@fzd.tu-darmstadt.de, Tel.: +49(0)6151-166576, Fax: +49(0)6151-165192

<sup>3</sup>winner@fzd.tu-darmstadt.de, Tel.: +49(0)6151-163796, Fax: +49(0)6151-165192

## **IPG Automotive GmbH**

Bannwaldallee 60, 76185 Karlsruhe

<sup>2</sup>stephan.hakuli@ipg.de, Tel.: +49(0)721-9852048, Fax: +49(0)721-9852099

Der Beitrag zu dieser Veröffentlichung wurde während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt erarbeitet.

## **Technische Universität Darmstadt**

### **Institut für Arbeitswissenschaft**

Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt:

<sup>4</sup>b.franz@iad.tu-darmstadt.de, Tel.: +49(0)6151-167040, Fax: +49(0)6151-163488

<sup>5</sup>kauer@iad.tu-darmstadt.de, Tel.: +49(0)6151-167040, Fax: +49(0)6151-163488

---

## Kurzfassung

---

Conduct-by-Wire (CbW) steht für ein hochautomatisiertes Fahrzeugführungskonzept, bei dem die konventionelle Fahrer-Fahrzeug-Interaktion von der Stabilisierungsebene auf die Bahnführungsebene angehoben wird. Die Steuerung eines Conduct-by-Wire-Fahrzeugs erfolgt über ereignisdiscrete Manöverbefehle des Fahrers. Einen Schwerpunkt der Bewertung der technischen Realisierbarkeit stellt dabei die Ermittlung der sich ergebenden Anforderungen an die Umfelderkennung dar.

Gegenstand dieses Beitrags ist die Vorstellung einer Top-down-Methodik, die eine systematische Ermittlung der Anforderungen ermöglicht, die aus der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion resultieren. Die Grundlage bildet dabei das sogenannte „Gate-Konzept“, das die Manöverausführung in Entscheidungsabschnitte unterteilt. Die Gates markieren die Punkte entlang einer geplanten Trajektorie, an denen eine Entscheidung über die Fortsetzung der Manöverausführung zu treffen ist. In Abhängigkeit unterschiedlicher CbW-Automationsgrade wird der für den kooperativen Entscheidungsprozess zwischen Fahrer und Automation erforderliche Informationsbedarf für das Beispiel einer Kreuzungssituation analysiert. Die Ergebnisse dieser Analyse ermöglichen anschließend die Ableitung der Anforderungen, die die maschinelle Umfelderkennung erfüllen muss, um eine rein manöverbasierte Fahrzeugführung zu ermöglichen und eine sichere Manöverausführung zu gewährleisten. Dieser Beitrag schließt mit einer Analyse heutiger Umfeldsensorik und einer Bewertung ihrer Eignung für CbW basierend auf den zuvor genannten Ergebnissen.

---

## 1 Einleitung und Motivation

---

### 1.1 Motivation

Heutige Fahrerassistenzsysteme (FAS) haben einen bislang nicht gekannten Standard hinsichtlich Sicherheit und Fahrkomfort geschaffen. Fahrzeuge werden zunehmend „intelligenter“ und ermöglichen es dem Fahrer, spezifische Teilaufgaben der Fahrzeugführung an diese Systeme zu delegieren oder die Automation die vollständige Fahrzeugführung in Notsituationen übernehmen zu lassen. Der wissenschaftlich nachgewiesene Nutzen von FAS [1] wird jedoch von einem wichtigen Nachteil begleitet: der zunehmenden Komplexität. Derzeit werden die meisten FAS getrennt voneinander entwickelt, mit der Konsequenz, dass jedes dieser Systeme über eine eigene Nutzerschnittstelle und ein eigenes Interaktionskonzept verfügt. Diese zunehmende Komplexität steht im Widerspruch zu dem ursprünglichen Ziel der Komfort- und Sicherheitserhöhung.

Eine mögliche Lösung für das beschriebene Problem der Erhöhung der Bedienkomplexität im Falle einer Kombination mehrerer Assistenzsysteme und ein wichtiger Schritt in Richtung des vollautomatisierten Fahrens stellen innovative, kooperative Fahrzeugführungskonzepte wie H-Mode [2] oder Conduct-by-Wire (CbW) dar. Die Konzeptidee von CbW besteht darin, die Fahrzeugführung von der Stabilisierungsebene durch eine auf Manöverbefehlen basierende Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auf die Bahnführungsebene anzuheben. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird hierdurch die konventionelle und kontinuierliche Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug auf der Stabilisie-

rungebene durch eine ereignisbasierte Kommunikation über Manöver auf der Bahnführungsebene ersetzt.

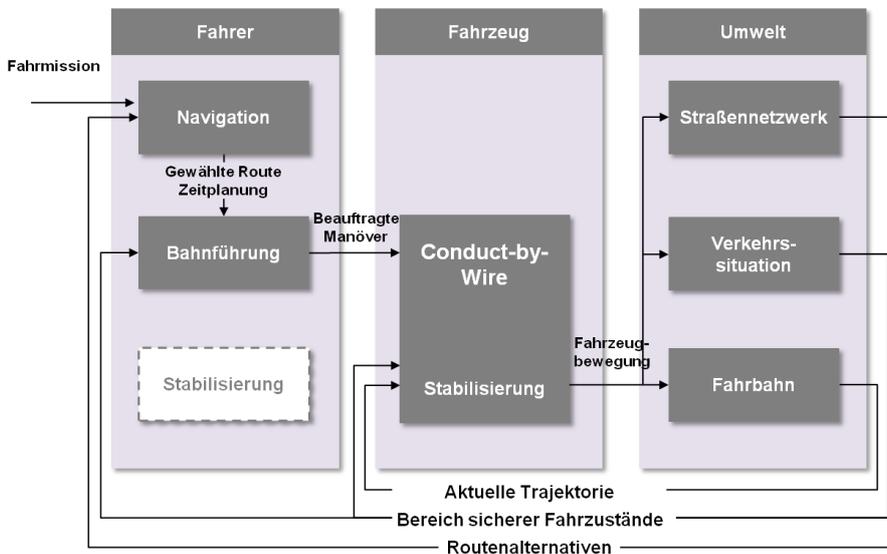


Abbildung 1: Manöverbasierte Fahrzeugführung nach dem CbW-Prinzip [3]

Der Fahrer beauftragt Manöverbefehle über eine sogenannte Manöverschnittstelle, die zudem bei Bedarf eine Parametrierung der gewählten Manöver sowie eine Interaktion auf der Stabilisierungsebene ermöglicht. Diese Manöverschnittstelle steht sowohl stellvertretend für die Mensch-Maschine-Schnittstelle als auch für das Interaktionskonzept selbst [4]. Auf diese Weise delegiert der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs die Aufgaben der Trajektorienplanung und der Fahrzeugstabilisierung an die Automation. Dieses Konzept ermöglicht einen größtmöglichen Automatisierungsgrad unter Beibehaltung der Verantwortung über die Fahrzeugführung durch den Fahrer gemäß dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr [5].

In einem Forschungsprojekt an der Technischen Universität Darmstadt wird die technische Realisierbarkeit des Conduct-by-Wire-Konzepts untersucht. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion [6], der Entwicklung des erforderlichen Funktionsumfangs der Automation [7] sowie auf der Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfelderkennung. In ersten vielversprechenden Probandenstudien wurde die Nutzerakzeptanz der manöverbasierten Fahrzeugführung untersucht [8].

## 2 Conduct-by-Wire-Systemarchitektur

Die Grundlage der technischen Realisierung bildet der in Abbildung 2 dargestellte Ausschnitt der Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene, die in zwei Unterebenen, die Manöver- und die Trajektorienebene, unterteilt ist.

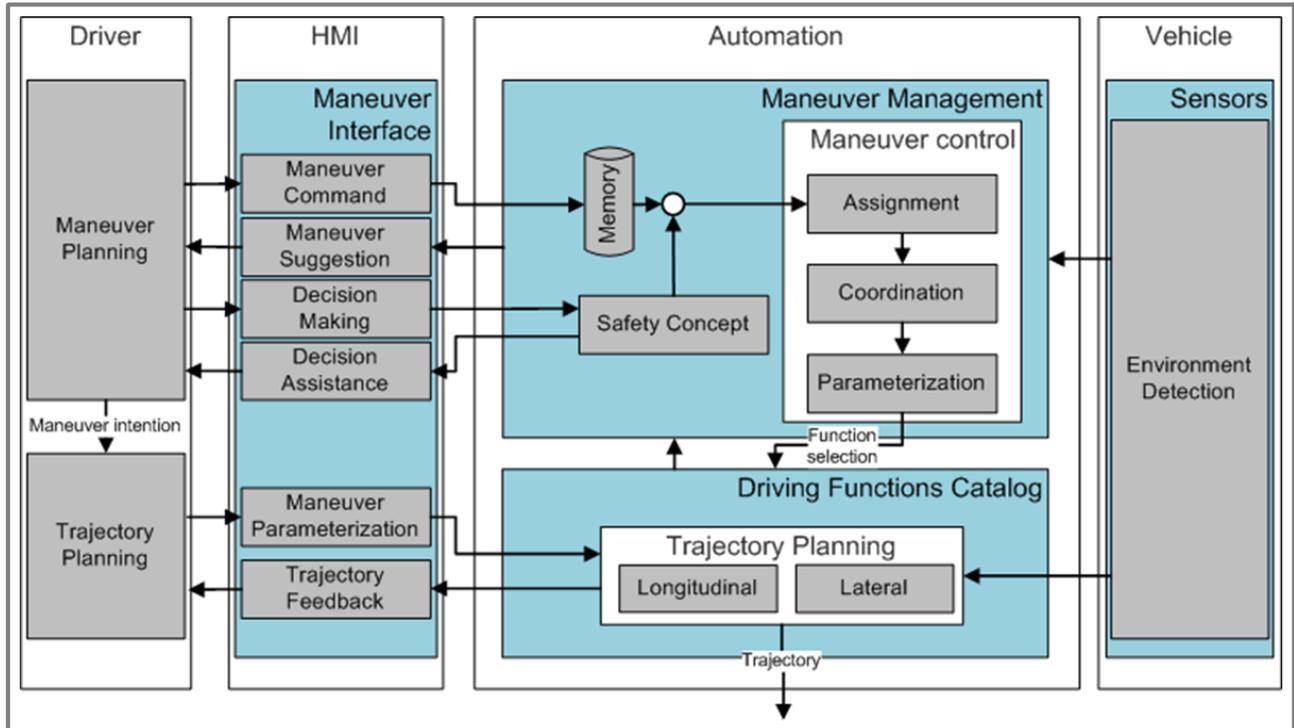


Abbildung 2: Ausschnitt der Conduct-by-Wire-Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene

Wie bereits dargestellt, basiert das CbW-Prinzip auf einer klaren Aufgabenteilung zwischen Fahrer (Manöverbeauftragung) und Automation (Manöveraushführung). Die vom Fahrer beauftragten Fahrmanöver werden über die Manöverschnittstelle an die Automation übergeben. Die Aufgabe der Manöversteuerung, als Teil des Manöver-Managements, besteht in der situationsabhängigen Zuordnung des Manöverbefehls zu einem Paar aus einer longitudinalen und einer lateralen Fahrfunktion, sowie deren Koordinierung und Parametrierung. Die Fahrfunktionen berechnen auf Basis der erforderlichen Fahrzustands- und Umfeldinformationen die zum Manöver gehörige Trajektorie sowie die Führungsgrößen für die Aktoransteuerung auf der Stabilisierungsebene. Der Fahrer hat hierbei die Möglichkeit, die Trajektorienplanung durch Parametrierung des Manöverbefehls, wie beispielsweise über die Wahl der Exzentrizität zur Fahrstreifenmitte beim Folgen des Fahrstreifens, zu beeinflussen. Die Ausführung der Fahrfunktionen impliziert seitens der Automation weitere Unteraufgaben, wie beispielsweise die Überprüfung der Ausführbarkeit von Manöverbefehlen, die sichere Trajektorienplanung, oder das Detektieren unsicherer Fahrzustände.

Fahrsituationen, in denen die Trajektorien anderer vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer gekreuzt werden, erfordern zusätzliche, kognitive Fähigkeiten, um eine sichere Fortsetzung der Fahrmission zu garantieren. In [6] wurde ein neuer Ansatz für die systematische Analyse des für die Entscheidungsfindung in unterschiedlichen Fahrszenarien erforderlichen Informationsbedarfs vorgestellt. Kern dieses Ansatzes ist das sogenannte „Gate-Konzept“, das in einer Segmentierung der Fahrzeugführungsaufgabe besteht. Die Gates markieren die Punkte entlang einer geplanten Trajektorie, an denen eine Entscheidung über die Fortsetzung der Fahrmission zu treffen ist. Jedem Gate ist ein Informationscluster zugewiesen, das die verschiedenen, an diesem Punkt erforderlichen Informationen umfasst.

---

Bei der Annäherung an ein Gate kann der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs bei der Entscheidungsfindung in kooperativer Weise durch die Automation in Abhängigkeit des realisierten Automationsgrades unterstützt werden (vgl. Abbildung 2):

- **Automationsgrad 1:** Die Automation zeigt dem Fahrer das nächste Gate an, die Entscheidung erfolgt durch den Fahrer.
- **Automationsgrad 2:** Die Automation zeigt dem Fahrer das nächste Gate an und macht einen Entscheidungsvorschlag, die endgültige Entscheidung erfolgt durch den Fahrer.
- **Automationsgrad 3:** Verantwortungsteilung zwischen Fahrer und Automation in Abhängigkeit des bei der Entscheidung möglichen Fehlers. Im Falle von Entscheidungen mit potentielltem False-Positive-Fehler, bspw. der Entscheidung vor dem Kreuzungsbereich anzuhalten, da dieser durch andere Objekte belegt ist, zeigt die Automation dem Fahrer das nächste Gate an und macht einen Entscheidungsvorschlag. Entscheidungen mit potentielltem False-Negative-Fehler, beispielsweise der Entscheidung den Kreuzungsbereich zu passieren, da dieser frei ist, werden von der Automation getroffen, wobei der Fahrer über die Entscheidung und daraus resultierende Handlungen informiert wird.

Bei dem Gate-Konzept handelt es sich um ein aus Sicht der Automation motiviertes Konzept. Die Idee besteht darin, zeitaufwändige oder falsche Entscheidungen durch die Automation in komplexen Fahrsituationen, wie für vollautomatisierte Konzepte in [9] beschrieben, durch Einbeziehung des Fahrers als zusätzliche Entscheidungsinstanz zu verkürzen beziehungsweise zu korrigieren. In den Fällen, in denen weder von der Automation noch vom Fahrer eine Entscheidung getroffen werden kann, bleibt das Gate bildlich gesprochen geschlossen. In diesem Fall wird das momentan ausgeführte Manöver zurückgestellt und durch ein Gate-Annäherungs-Manöver ersetzt. Alle Gate-Annäherungsstrategien führen gemäß dem CbW-Sicherheitskonzept dazu, dass das Fahrzeug an der Gate-Position zum Stehen kommt. Nach „Freischaltung“ des Gates wird das unterbrochene Manöver aus dem Speicher reaktiviert.

---

### 3 Untersuchungsmethodik

---

Gegenstand dieses Beitrags ist die Vorstellung einer Top-down-Methodik, die eine systematische Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung eines CbW-Fahrzeugs, basierend auf dem in unterschiedlichen Fahrsituationen existierendem Informationsbedarf, ermöglicht. Die Umfelderkennung schließt hierbei die maschinelle Umfelderkennung sowie die Nutzung digitaler Karten als Informationsquellen ein. Im Hinblick auf die Untersuchung der technischen Realisierbarkeit des CbW-Konzepts mit dem heute verfügbaren Stand der Technik, werden kommunikationsbasierte Car2X-Lösungen aufgrund ihrer noch schwachen Verbreitung zunächst nicht betrachtet.

Aus der zuvor beschriebenen Systemarchitektur sind die Schnittstellen zwischen der Umfelderkennung und den verschiedenen Funktionsbereichen der CbW-Automation ersichtlich. Dies umfasst zunächst die eigentliche automatisierte Fahrzeugführung, die situationsabhängig von der Manöversteuerung und den Fahrfunktionen realisiert wird. Zudem liefert die Umfelderkennung die

---

Eingangsgrößen für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auf der Manöverebene. Basierend auf den aktuellen Umfelddaten unterstützt die Automation den Fahrer gemäß den zuvor beschriebenen CbW-Automationsgraden bei der Entscheidungsfindung an den Gates. Während einige Anforderungen an die Umfelderkennung der für CbW erforderlichen Fahrfunktionen mit denen heutiger oder in der Entwicklung befindlicher Fahrerassistenzsystem vergleichbar sind, ergeben sich aus der Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation auf der Bahnführungsebene neue technische Herausforderungen. Der Fokus dieses Beitrags liegt daher auf der Betrachtung der sich aus der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ergebenden Anforderung an die maschinelle Umfelderkennung eines CbW-Fahrzeugs.

### **3.1 CbW-Situationskatalog**

Die Grundlage der Anforderungsermittlung basiert auf der Anwendung des Gate-Konzepts auf eine Vielzahl von Fahrsituationen. Das Ziel bekannter Fahrsituationskataloge besteht entweder in der Identifikation potentiellen Assistenzbedarfs basierend auf einer Unfalldatenanalyse als Grundlage für die Entwicklung neuer FAS (z.B. [10]), oder in der Analyse des Fahrerverhaltens (z.B. [11]). Da für die Analyse der technischen Realisierbarkeit von CbW alle potentiellen Situationen betrachtet werden müssen, die ein CbW-Fahrzeug bewältigen muss, erscheinen beide Ansätze als nicht geeignet. Daher wurde ein Fahrsituationskatalog (siehe Tabelle 1) entwickelt, der aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) [12] und der Straßenverkehrsordnung (StVO) [13] abgeleitet ist und anhand realer Verkehrssituationen im Rhein-Main-Gebiet verifiziert wurde. Die Situationen dieses Katalogs lassen sich einer von vier Situationsklassen (Kreuzung, Kreisverkehr, Querverkehr, Längsverkehr) zuordnen. Da der Katalog auf rechtlichen Vorgaben basiert, werden nur zulässige Parametervariationen berücksichtigt, wodurch die Zahl möglicher Parametervariationen automatisch begrenzt wird.

Tabelle 1: CbW-Fahrsituationskatalog

Situationsklasse	Situation	Parameter
Kreuzung	X-Kreuzung	Vorfahrtsregelung
	T-Kreuzung	Zufahrtsrichtung
	Sternkreuzung	Anzahl der Kreuzungszufahrten Anzahl der Kreuzungsausfahrten Anzahl der Fahrstreifen Geometrie
	Verkehrinsel	Vorfahrtsregelung
	Wendefahrbahn	Vorfahrtsregelung Anzahl der Fahrstreifen
Kreisverkehr	Kreisverkehr	Vorfahrtsregelung Anzahl der Fahrstreifen Geometrie
	Bypass	Vorfahrtsregelung
Querverkehr	Fußgängerüberweg	Vorfahrtsregelung
	Fahrradweg	
	Bahnübergang	
Längsverkehr	Fahrtsreifenende	Einseitig/beidseitig Rechts/links
	Hindernis ausweichen	Rechts/links Mit/ohne Fahrtsreifenwechsel Paralleler/entgegenkommender Fahrstreifen
	Sonderfahrstreifen	Rechts/links
	Lichtsignalanlage	

Die Anwendung des Gate-Konzepts auf alle Situationen des CbW-Situationskatalogs ermöglicht eine systematische Analyse der erforderlichen Umfelddaten zur Deckung des den Gates zugewiesenen Informationsbedarfs. Der CbW-Situationskatalog bildet die Grundlage der in diesem Beitrag vorgestellten Methode. Durch Kombination von Situationen unterschiedlicher Situationsklassen, beispielsweise die Kombination eines Kreisverkehrs mit Fußgängerüberwegen, mit den in diesen Situationen möglichen Manövern ergeben sich ca. 400 analysierte Szenarien.

### 3.2 Analyse des Entscheidungsprozesses

Der Entscheidungsprozess während der Annäherung an ein Gate lässt sich, wie in Abbildung 3 dargestellt, in weitere Schritte unterteilen. Den Ausgangspunkt bildet der Zustand der entscheidungs-

freien Fahrt, in dem die Fahrzeugführung von einer aktivierten longitudinalen und einer lateralen Fahrfunktion ausgeführt wird.

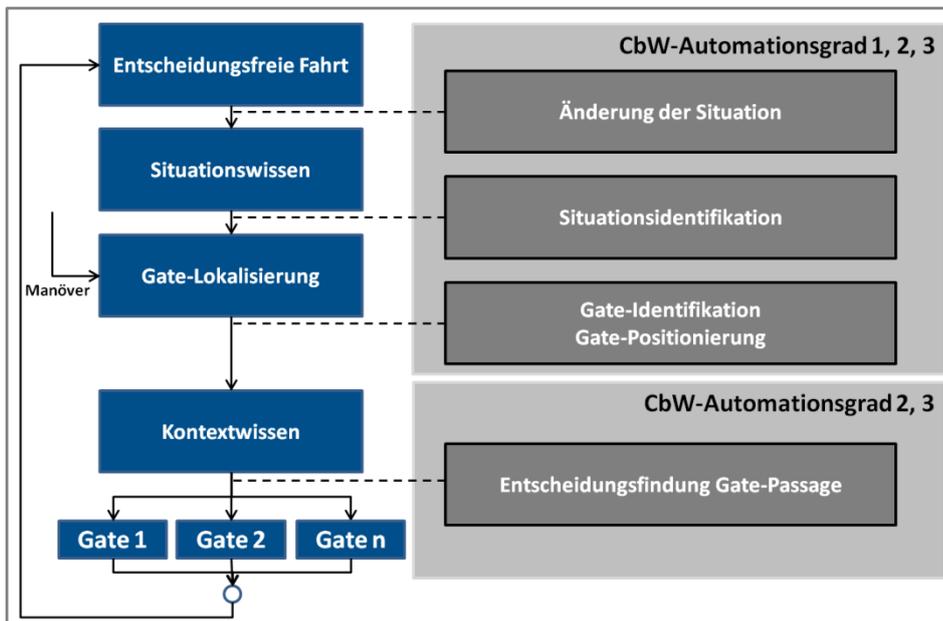


Abbildung 3: Entscheidungsprozess während der Annäherung an ein Gate

Im Falle einer Situationsänderung, beispielsweise der Zufahrt auf einen Kreisverkehr oder auf ein statisches Hindernis im eigenen Fahrstreifen, die zusätzliche Entscheidungen hinsichtlich der Fortführung der Fahrmission erfordert, endet die entscheidungsfreie Fahrt. Die Erkennung dieses Zustandsübergangs bedingt seitens der Automation die Fähigkeit, die Kriterien zu identifizieren, die eine Widerlegung der Grundhypothese des Zustands der entscheidungsfreien Fahrt ermöglichen. Im Falle des höchsten CbW-Automationsgrades 3 ist das Situationswissen zudem für die Überprüfung der Ausführbarkeit der vom Fahrer beauftragten Manöver erforderlich. Dies ist notwendig, da dieser Automationsgrad hinsichtlich der Manöverausrührung dem vollautomatisierten Fahren ähnelt. Hierbei kann, im Gegensatz zu den anderen beiden Automationsgraden, die immer eine Handlung vom Fahrer erfordern, nicht für jede Situation angenommen werden, dass der Fahrer die Manöverausrührung aufmerksam verfolgt. Hierdurch besteht die Gefahr, dass Fehlentscheidungen der Automation nicht vom Fahrer bemerkt werden und dies somit ein Sicherheitsrisiko darstellt. Die Lokalisierung der Gates erfolgt im ersten Schritt über die Gate-Identifikation, die auf einer logischen Zuordnung der die Situation beschreibenden Parameter und der als Regelwerk hinterlegten Definition der Gate-Positionen und des jeweils zugewiesenen Informationsbedarfs basiert und demnach keine zusätzlichen Anforderungen an die Umfelderkennung stellt. Im darauf folgenden Schritt werden die Gate-Positionen in Abhängigkeit der aktuellen Umfelddaten (bspw. der Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen) bestimmt. Die beschriebenen Prozessschritte ermöglichen somit eine Lokalisierung der in der jeweiligen Fahrsituation für das vom Fahrer beauftragte Manöver zu passierende Gate, was die Grundlage aller drei CbW-Automationsgrade bildet.

Die CbW-Automationsgrade 2 und 3, bei denen die Automation einen Vorschlag bzw. eine Entscheidung über die Durchfahrt am Gate trifft, erfordern zusätzliches Kontextwissen über das aktuelle Szenario (bspw. über die Trajektorien der sich auf der Kreisbahn befindenden Objekte), um den

Informationsbedarf zur Entscheidungsfindung während der Annäherung oder am Gate decken und somit eine Entscheidung treffen zu können.

## 4 Anforderungen an die Umfelderkennung

Jeder der zuvor beschriebenen Teilschritte des Entscheidungsprozesses stellt unterschiedliche Anforderungen an die Umfelderkennung. Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik basiert auf einer systematischen Analyse der jeweils erforderlichen Umfelddaten für jeden dieser Teilschritte und den sich daraus ergebenden Anforderungen an die Umfelderkennung. Diese Teilschritte werden dabei exemplarisch für eine einfache Kreuzungssituation (ohne Fußgängerüberwege, Sonderfahrstreifen, o.ä.) demonstriert. Hierbei sind an verschiedenen Stellen Annahmen erforderlich, die jeweils dem Ziel einer Worst-Case-Abschätzung entsprechend getroffen werden.

### 4.1 Situationswissen

Der Informationsbedarf zur Erkennung eines Situationsübergangs mit Entscheidungsbedarf am Beispiel der Kreuzung und somit die Grundlage für den folgenden Schritt der Gate-Lokalisierung ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Erforderliches Situationswissen an Kreuzungen

Informationsbedarf	Erkennung mittels Umfelddaten
Existenz der Kreuzung (Ende entscheidungsfreie Fahrt)	Erkennung Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
Vorfahrtsregelung	Erkennung Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen
Kreuzungstyp (X-, T-, oder Sternkreuzung)	Anzahl der verbundenen Straßenzüge Erkennung Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
Anordnung Straßenzüge bezogen auf Ego-Zufahrt	Erkennung Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
Kreuzungszufahrten	Erkennung Verkehrszeichen
Kreuzungsausfahrten	Erkennung Verkehrszeichen
Zulässige Fahrtrichtungen des Ego-Fahrstreifens	Erkennung Fahrbahnmarkierungen

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, überführt die Automation das Fahrzeug durch Anhalten am Gate in einen sicheren Zustand, sofern keine Entscheidung über das Verhalten am Gate getroffen wird. Der Zeitpunkt der Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers hängt dabei von der Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs  $v_{Ego}$  und der gewählten Verzögerung zur Annäherung an das Gate  $d_G$  ab. Der sich ergebende Anhalteweg und somit der Abstand zum Gate, bei dem die Annäherungsstrate-

gie initiiert wird, lässt sich unter Annahme einer konstanten Verzögerung mit folgender Gleichung berechnen:

$$s_{AS} = -\frac{v_{Ego}^2}{2d_G} \quad (1)$$

Für eine exemplarische Verzögerung von  $-3 \text{ m/s}^2$  und  $-5 \text{ m/s}^2$  ergeben sich die in Tabelle 3 aufgeführten Abstände.

Tabelle 3: Abstand zum Gate bei Initiierung der Annäherungsstrategie

Ausgangsgeschwindigkeit $v_{Ego}$	Abstand zum Gate bei Initiierung der Annäherungsstrategie $s_{AS}$	
	$d_G = -3 \text{ m/s}^2$	$d_G = -5 \text{ m/s}^2$
30 km/h	12 m	7 m
50 km/h	32 m	19 m
70 km/h	63 m	38 m
90 km/h	104 m	63 m

Bezogen auf das Beispiel der Kreuzung bedeutet dies, dass die Informationen zur Erkennung der Kreuzung und somit zur Erkennung des Endes der entscheidungsfreien Fahrt spätestens in der berechneten Entfernung zum ersten Gate, welches an der Einfahrt in die Kreuzung positioniert ist, vorliegen müssen.

## 4.2 Gate-Lokalisierung

Wie in Abschnitt 3 dargestellt, erfolgt die Gate-Identifikation als Grundlage für die darauf folgende Gate-Lokalisierung auf Basis einer logischen Verknüpfung von identifizierter Situation und hinterlegtem Regelwerk. In Abbildung 4 ist die Gesamtheit aller an einer Kreuzung für die Manöver Linksabbiegen, Rechtsabbiegen, Kreuzen und Wenden möglichen Gates dargestellt. Das Ego-Fahrzeug nähert sich hierbei der Kreuzung aus Richtung Süden.

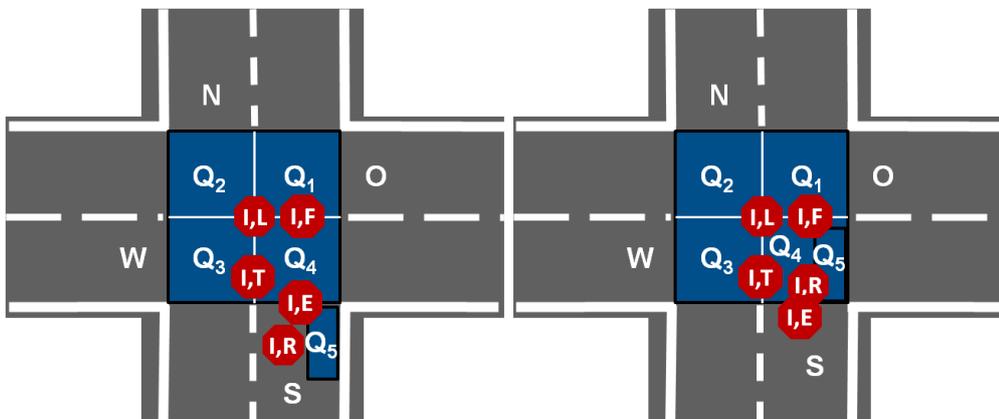


Abbildung 4: Nomenklatur zur Beschreibung einer Kreuzungssituation

---

Die Definition der jeweiligen Gate-Positionen und der daraus abgeleitete Informationsbedarf ist in Tabelle 4 aufgeführt. Im Falle von Gate I,E und Gate I,L gibt es in Abhängigkeit der vorhandenen Fahrbahnmarkierungen unterschiedliche Definitionen. Die Position von Gate I,R hängt von der gewählten Trajektorie bei der Ausführung des Rechtsabbiegemanövers ab. Demnach ist  $Q_5$  Teil von  $Q_4$  (I,R nach I,E) oder liegt vor  $Q_4$  (I,R vor I,E).

Die Deckung des Informationsbedarfs, welcher die Positionierung des ersten Gates der die entscheidungsfreie Fahrt beendenden Situation ermöglicht, ist hierbei unmittelbar nach der Situationsidentifikation erforderlich. Bezogen auf das Beispiel der Kreuzung, bei der es in Abhängigkeit der Kreuzungssituation und des beauftragten Manövers zu einer Abfolge mehrere Gates kommen kann, ist die Deckung des Informationsbedarfs zur Positionierung eines Gates spätestens an der Position des davor liegenden Gates erforderlich.

Tabelle 4: Definition der Gate-Positionen an einer Kreuzung und daraus abgeleiteter erforderlicher Informationsbedarf <sup>1</sup>

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf	Lage bzgl. Ego-Fahrzeug
I,E	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Lateral verlaufende Begrenzungslinie	vorne
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der gekreuzten Straße	vorne rechts/links
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie	vorne
I,L	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Vertikal verlaufende Begrenzungslinie	vorne links
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Begrenzungslinie des entgegenkommenden, kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden	vorne links links
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Diagonal verlaufende Haltlinie	vorne links
I,R	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit parallel um 0,5 m zur Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie der Ego-Zufahrt und der Begrenzungslinie der gegenüberliegenden Ausfahrt verlaufender virtueller Linie <sup>2</sup> .	Begrenzung Kreuzungseinfahrt und gegenüberliegende Ausfahrt	vorne rechts rechts
I,F	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Fahrstreifenbegrenzungslinie der abknickenden Vorfahrtsstraße	Fahrstreifenbegrenzungslinie	vorne
I,T	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Vertikal verlaufende Begrenzungslinie	vorne links
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Begrenzungslinie des entgegenkommenden, kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden	vorne links links

<sup>1</sup> I,E: Intersection entry / I,L: Intersection left / I,T: Intersection turn / I,F: Intersection front / I,R: Intersection right

<sup>2</sup> Annahme für einen in der StVO §5.8 und StVO §9.3 nicht näher definierten einzuhaltenen seitlichen Abstand, der Fahrradfahrern und Mofa-Fahrern das Passieren rechts neben dem Ego-Fahrzeug ermöglicht.

### 4.3 Kontextwissen

Den letzten Prozessschritt der Entscheidungsfindung bildet das Kontextwissen, das es der Automation ermöglicht, eine Entscheidung bezüglich dem Passieren des Gates zu treffen. Je nach Automationsgrad zeigt die Automation dem Fahrer einen Vorschlag zur Entscheidung an (CbW-Automationsgrad 2) oder trifft diese eigenständig (CbW-Automationsgrad 3). Der aus dem Kontextwissen abgeleitete und für die Entscheidungsfindung erforderliche Informationsbedarf ist in Tabelle 5 für die vier möglichen Manöver an einer Kreuzung aufgeführt und den möglichen Gates zugeordnet. Zum Informationsbedarf zählen das angezeigte Signal einer möglichen Lichtsignalanlage, die Belegung der Kreuzungsquadranten gemäß Abbildung 4 und der jeweiligen Kreuzungsausfahrt sowie die Berücksichtigung von sich aus den jeweiligen Zufahrtsrichtungen nähernden vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer.

Tabelle 5: Erforderlicher Informationsbedarf zur Entscheidungsfindung am Gate

Informationsbedarf	Gate			
	Linksabbiegen	Kreuzen	Rechtsabbiegen	Wenden
Signal der Lichtsignalanlage	I,E			
Vorrang Norden	I,E/I,L	I,E	I,E	I,E/I,T
Vorrang Osten	I,E	I,E/I,F	-	I,E
Vorrang Süden	-	-	I,R	-
Vorrang Westen	I,E			
Belegung Q <sub>1</sub>	-	I,E/I,F	-	-
Belegung Q <sub>2</sub>	I,E/I,L	-	-	-
Belegung Q <sub>3</sub>	-	-	-	I,E/I,T
Belegung Q <sub>4</sub>	I,E			
Belegung Q <sub>5</sub>	-	-	I,R	-
Belegung Ausfahrt	I,E/I,L	I,E/I,F	I,E/I,R	I,E/I,T

Die Abschätzung der erforderlichen Reichweite der Umfeldsensorik erfolgt für zwei Extrembetrachtungen. Erstere ist der Zustand, in dem die Entscheidung über das Passieren des Gates erst am Gate getroffen wird. In diesem Fall befindet sich das CbW-Fahrzeug im Stillstand. Die zweite Abschätzung erfolgt für den Fall, bei dem die Manöverausführung nicht durch die Aktivierung des Gate-Annäherungsmanövers unterbrochen wird. Die Ermittlung der erforderlichen Sensorreichweiten basiert auf verschiedenen Annahmen und Sicherheitskriterien bei der Manöverausführung, die im Folgenden dargestellt werden. Folgende Parameter, die die Informationsverfügbarkeit negativ beeinflussen, werden hierbei zunächst vernachlässigt:

- Krümmung des Fahrbahnverlaufs der Kreuzungszufahrten
- Schnittwinkel der Fahrbahnen

- Lateraler Versatz der gegenüberliegenden Kreuzungsausfahrt
- Sichtverdeckungen

Als Kreuzung wird gemäß einer Worst-Case-Annahme die in Abbildung 5 dargestellte X-Kreuzung mit zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn definiert<sup>3</sup>. Die Fahrbahnen schneiden sich jeweils im rechten Winkel. Mit einer Standard-Fahrstreifenbreite  $w_l$  von 3,5 m gemäß der RAS<sup>4</sup> ergibt sich demnach eine Kreuzungsbreite  $w_l$  und -länge  $l_l$  von jeweils 14 m.

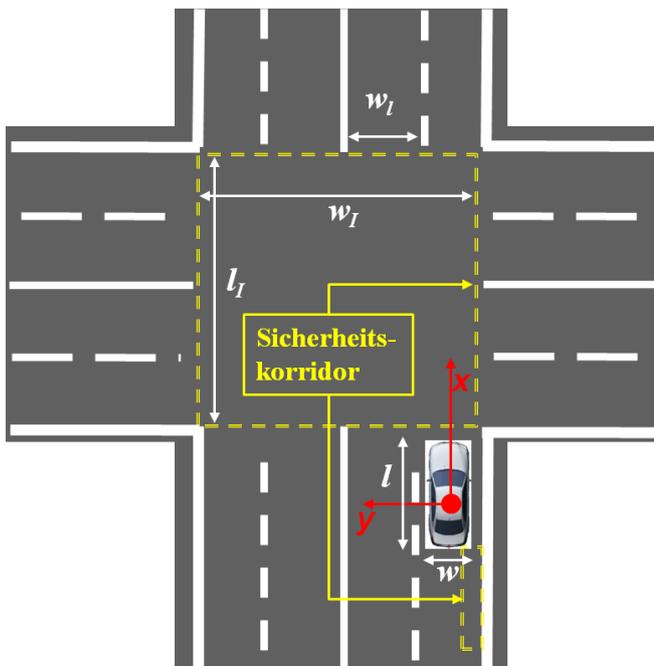


Abbildung 5: Kreuzungsgeometrie

Einen weiteren Einfluss auf die Informationsverfügbarkeit und eine signifikante Auswirkung auf die Anordnung der Umfeldsensoren hat der Ausrichtungswinkel  $\alpha$  des Ego-Fahrzeugs bezogen auf die Längsrichtung am jeweiligen Gate. Für das Manöver Kreuzen wird angenommen, dass  $\alpha=0^\circ$  beträgt. Für die Ausführung eines Abbiegemanövers wird eine Trajektorie entlang eines Viertelkreisbogens mit dem Radius  $R$  angenommen. Beim Rechtsabbiegen gilt hierbei die Annahme, dass das Ego-Fahrzeug einer, wie in Abbildung 6 dargestellt, parallel zur Eckausrundung der Kreuzungseinfahrt verlaufenden Trajektorie folgt.

<sup>3</sup> Kreuzungen mit mehrstreifigem Gegenverkehr sind gemäß der Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [14], S. 13-14, mit einer getrennten Signalisierung des abbiegenden Verkehrs auszuführen, wodurch die Berücksichtigung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer aus Richtung Norden, Westen und Osten entfällt.

<sup>4</sup> Durchschnittliche Fahrstreifenbreite gemäß den Vorgaben aus der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RAS<sup>t</sup>), S.69-71

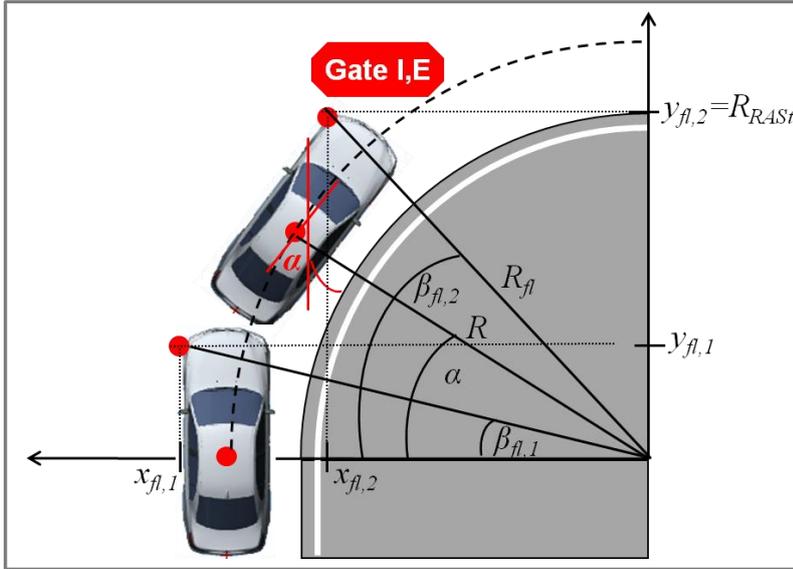


Abbildung 6: Ausrichtung des Ego-Fahrzeugs am Gate I,E

Gemäß der RASl<sup>5</sup> beträgt der einzuhaltende Radius für Eckausrundungen an Kreuzungen innerhalb geschlossener Ortschaften zwischen  $R_{RASl,min}=8$  m und  $R_{RASl,max}=12$  m. Für die Berechnung der Fahrzeugausrichtung am Gate I,E beziehungsweise I,R ist der erste Schnittpunkt des Ego-Fahrzeugs mit den in Tabelle 4 angegebenen Grenzlinien zu ermitteln. Für Gate I,E ist dies der Schnittpunkt der vorderen linken Fahrzeugecke mit der bei  $y=R_{RASl}$  verlaufenden lateralen Grenzlinie, für Gate I,R ist dies der Schnittpunkt der vorderen rechten Fahrzeugecke mit der bei  $x=R_{RASl}+0,5$  m verlaufenden vertikalen Grenzlinie<sup>6</sup>. Der gesuchte Mittenwinkel  $\alpha$ , der die Bahnkurve des Schwerpunkts bis zum Erreichen des Gates beschreibt, berechnet sich hierbei aus der Differenz der Winkel  $\beta_2$ , der sich im gleichen Zustand für die Kreisbahn des relevanten Fahrzeugeckpunkts einstellt, zur Ausgangslage mit dem Winkel  $\beta_1$ . Für Gate I,E ergibt sich somit:

$$\alpha_{I,E} = \beta_{fl,2} - \beta_{fl,1} = \arctan\left(\frac{R_{RASl}}{\sqrt{R_{fl}^2 - R_{RASl}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l}{2R+w}\right) \text{ mit } R_{fl}^2 = \sqrt{x_{fl,1}^2 + y_{fl,1}^2} \quad (2)$$

Das Maximum für  $\alpha$  ergibt sich für den Fall einer Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit  $R_{RASl,max}$  und maximal negativer Exzentrizität<sup>7</sup> innerhalb des Fahrstreifens entlang eines Viertelkreisbogens mit  $R=13$  m zu  $\alpha_{I,E,max}=48^\circ$ . In gleicher Weise lässt sich  $\alpha_{I,R,max}=16^\circ$  für  $R_{RASl,min}$  und maximal positive Exzentrizität ermitteln. Das Vorgehen für das Linksabbiegemanöver ist identisch. Hierbei wird angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug auf einem Radius bewegt, der der halben Kreuzungsbreite  $w_l$  zuzüglich dem Abstand des Fahrzeugmittelpunkts zur linken Fahrstreifengrenze entspricht. Unter Annahme eines Winkels  $\alpha_{I,E}=0^\circ$  zu Beginn des Linksabbiegemanövers ergibt sich aus der Berechnung des Schnittpunkts der linken vorderen Fahrzeugecke mit der vertikalen Verlängerung der lin-

<sup>5</sup> Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASl), S.123

<sup>6</sup> Der in Tabelle 4 angenommene Abstand von I,R zur rechten Fahrstreifengrenze beträgt 0,5 m.

<sup>7</sup> Eine negative Exzentrizität ergibt sich für die Lage des Fahrzeugschwerpunkts rechts von der Fahrstreifenmitte.

---

ken Fahrstreifenbegrenzung und der Worst-Case-Annahme einer Kreuzung mit einem Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn ( $R=2w_l-w/2$ ) zu  $\alpha_{I,L,max}=25^\circ$ .

Die Ermittlung der erforderlichen Sensorreichweiten basiert auf verschiedenen weiteren Annahmen und Sicherheitskriterien bei der Manöverausführung, die im Folgenden dargestellt werden. Die Angaben der Reichweiten  $R_x$  und  $R_y$  in x- und y-Richtung beziehen sich auf das in Abbildung 5 dargestellte fahrzeugeigene Koordinatensystem, dessen Ursprung in der Fahrzeugmitte liegt.

### 4.3.1 Signal der Lichtsignalanlage

Aus der Erkennung des angezeigten Signals der an der Kreuzungseinfahrt positionierten Lichtsignalanlage ergibt sich, unter Berücksichtigung der maximalen Exzentrizität im Fahrstreifen, die laterale Sensorreichweite aus der Fahrstreifenbreite und der Breite des Ego-Fahrzeugs zu

$$R_y = w_l - \frac{w}{2} \quad (3)$$

Die longitudinale Reichweite entspricht für den Fall, dass das CbW-Fahrzeug an der Haltelinie, die der Gate-Position entspricht, steht, der Mindestreichweite aus dem in der Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) definiertem Abstand der Haltelinie zur Lichtsignalanlage<sup>8</sup> von bis zu 5 m. Für den Fall der Gate-Annäherung stimmt die longitudinale Reichweite mit dem erforderlichen Anhalteweg aus der Geschwindigkeit  $v_{Ego}$  überein, der näherungsweise den in Tabelle 3 ermittelten Werten entspricht.

### 4.3.2 Vorfahrtsberechtigte Verkehrsteilnehmer

Die erforderliche Reichweite, die sich aus der Erkennung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer ableiten lässt, basiert auf der Ermittlung der für die Manöverausführung erforderlichen Zeit  $t_{ME}$ . Hierzu wird ein Sicherheitskorridor definiert, den andere Verkehrsteilnehmer während der Manöverausführung bzw. der Ausführung eines Manöverteilschnitts zwischen zwei Gates durch das Ego-Fahrzeug nicht befahren dürfen. Der Sicherheitskorridor hängt dabei von dem für das jeweilige Manöver in der aktuellen Fahrsituation zugewiesenen Informationsbedarf ab. Im Falle der Kreuzung entspricht der Sicherheitskorridor den vier Kreuzungsquadranten. Im Falle des Rechtsabbiegens umfasst der Sicherheitskorridor an Gate I,R zusätzlich den seitlichen Bereich zwischen Ego-Fahrzeug und rechtem Fahrbahnrand. Für die sichere Manöverausführung wird ein auf der Time-to-safety-corridor (TTS) basierendes Sicherheitskriterium definiert. Die TTS kennzeichnet die Zeit, die bei konstanter Geschwindigkeit  $v_{Object}$  bis zur Einfahrt in den im Abstand  $d_s$  beginnenden Sicherheitskorridor benötigt wird. Die TTS der sich der Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmer muss dabei mindestens der für die Manöverausführung des Ego-Fahrzeugs erforderlichen Zeit entsprechen:

$$TTS = \frac{d_s}{v_{Object}} \geq t_{ME} \quad (4)$$

---

<sup>8</sup> Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [14], S. 35

Die Zeit  $t_{ME}$  umfasst hierbei die Zeit, die für die Manöverdurchführung, beispielsweise das Linksabbiegen an einer Kreuzung, und die Dauer, die zur Erkennung anderer Objekte durch die maschinelle Umfelderkennung erforderlich ist. Letztere wird im Folgenden mit  $t_D = 1$  s abgeschätzt.

Hieraus lässt sich mit der Länge  $l$ , der Breite  $w$  und der Geschwindigkeit  $v_{Ego}$  des Ego-Fahrzeugs und dem Abstand zum Ende des Sicherheitskorridors die Mindestreichweite der Umfeldsensoren berechnen:

$$R_x = v_{Object} \cdot t_{ME} + v_{Ego} \cdot t_D + d_{S,x} \quad (5)$$

$$R_y = v_{Object} \cdot t_{ME} + v_{Ego} \cdot t_D + d_{S,y} \quad (6)$$

#### 4.3.2.1 Am Gate

Die Zeit  $t_{ME}$ , die für die Ausführung eines Manövers aus dem Stillstand erforderlich ist, kann unter Annahme einer konstanten Fahrzeugbeschleunigung  $a_V$  mit

$$t_{ME} = \sqrt{\frac{2s_{ME}}{a_V}} + t_D \quad (7)$$

abgeschätzt werden, wobei  $s_{ME}$  für die zurückzulegende Wegstrecke bis zum Ende der Manöverausführung steht, welche wiederum von der betrachteten Kreuzungsgeometrie abhängt. Das Manöver Wenden wird in dieser Worst-Case-Abschätzung nicht betrachtet, da es die kürzeste Wegstrecke und somit die kürzeste  $t_{ME}$  aller Manöver aufweist.

Für das Manöver Kreuzen beträgt  $s_{ME}$  ab dem Gate I,E mit der Kreuzungslänge  $l_I$

$$s_{ME,cross} = l_I + l \quad (8)$$

Für die Ausführung eines Abbiegemanövers wird gemäß Abbildung 6 eine Trajektorie entlang eines Viertelkreisbogens angenommen. Beim Rechtsabbiegen ergibt sich die längste Restbogenlänge, die ab dem Gate I,E bis zum Ende des Manövers zu durchfahren ist, für  $R_{RASt,max}$  und der Annahme einer maximalen positiven Exzentrizität des Ego-Fahrzeugs im Fahrtsreifen zu

$$R_{turn,right} = R_{RASt,max} + w_I - \frac{w}{2} \quad (9)$$

Aus dem mit Gleichung (2) berechneten Ausrichtungswinkel des Ego-Fahrzeugs am Gate  $\alpha_{Gate}$  lässt sich die verbleibende Wegstrecke ab dem Gate berechnen.

$$s_{ME,turn,right} = \frac{2\pi R_{turn,right}}{4} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{Gate}}{90^\circ}\right) \quad (10)$$

Für das Linksabbiegemanöver wird angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug auf einem Radius bewegt, der der halben Kreuzungsbreite  $w_I$  zuzüglich einer halben Fahrtsreifenbreite entspricht:

$$R_{turn,left} = \frac{w_I + w_I}{2} \quad (11)$$

Die für die Manöverausführung erforderliche Wegstrecke berechnet sich gemäß folgender Gleichung aus dem Ausrichtungswinkel des Ego-Fahrzeugs am Gate:

$$s_{ME,turn,left} = \frac{2\Pi R_{turn,left}}{4} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{Gate}}{90^\circ}\right) + l \quad (12)$$

Für Gate I,E wird angenommen, dass  $\alpha_{Gate}=0^\circ$  beträgt. Der Ausrichtungswinkel des Fahrzeugs an I,L lässt sich mit dem zuvor beschriebenen Verfahren berechnen.

Die auf diese Weise ermittelten Wegstrecken bilden die Grundlage für die Ermittlung der aus dem Informationsbedarf „Vorrang Norden“, „Vorrang Westen“ und „Vorrang Osten“ abgeleiteten Anforderungen. Hierbei ist zu beachten, dass der Informationsbedarf „Vorrang Norden“ am Gate I,E lediglich für den Fall des Einbiegens in eine abknickende Vorfahrtsstraße, welche in der Regel einstreifig ausgeführt ist, relevant ist. Hierdurch sind die zu betrachtenden Wegstrecken ab Gate I,E entsprechend limitiert.

In Abhängigkeit des Radius der befahrenen Bahnkurve beim Rechtsabbiegen kann Gate I,R gemäß der Definition nach Tabelle 4 auch vor Gate I,E und somit vor Einfahrt in den Kreuzungsbereich platziert sein. Aus diesem Grund werden die aus dem Informationsbedarf „Vorrang Süd“ abgeleiteten Anforderungen an die erforderliche Sensorreichweite gesondert betrachtet. Hierzu ist die Wegstrecke zur Überquerung des seitlichen Sicherheitskorridors, der der Fläche  $Q_5$  entspricht, durch das Ego-Fahrzeug relevant. Aus der gegebenen Breite dieser Fläche, die in Tabelle 4 mit 0,5 m angenommen wird, lässt sich der Mittelpunktswinkel  $\alpha$  und somit die zu überquerende Bogenlänge für einen Radius nach Gleichung (9) und schließlich die für die Ausführung dieses Manöverteilschnitts erforderliche Wegstrecke berechnen:

$$s_{ME,turn,right} = \Pi R_{turn,right} \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{0,5}{R_{turn,right}}\right)}{180} + l \quad (13)$$

#### 4.3.2.2 Vor Beginn der Gate-Annäherung

In der zweiten Extrembetrachtung werden die Anforderungen an die Umfelderkennung für die Bedingung ermittelt, dass die Manöverausführung nicht durch die Aktivierung eines Gate-Annäherungsmanövers unterbrochen wird. Hieraus ergibt sich, dass der aus dem Kontextwissen abgeleitete Informationsbedarf spätestens zum Zeitpunkt der Initiierung der Gate-Annäherungsstrategie gedeckt sein muss. Dies erfordert eine Anpassung der für die Manöverausführung erforderlichen Wegstrecke  $s_{ME}$  und Zeit  $t_{ME}$ . Die zu berücksichtigende Wegstrecke  $s_{ME}$  verlängert sich im Vergleich zu den vorherigen Gleichungen (8), (10), (12) und (13) um den in Tabelle 3 angegebenen Abstand zum Gate bei Initiierung der Annäherungsstrategie  $s_{AS}$ . Die Zeit  $t_{ME}$  hängt wiederum von dem Geschwindigkeitsprofil über  $s_{ME}$  ab. Für das Manöver Kreuzen ergibt sich unter Annahme einer konstanten Bewegung mit der Geschwindigkeit  $v_{Ego}$ :

$$t_{ME,cross} = \frac{s_{ME,cross} + s_{AS}}{v_{Ego}} + t_D \quad (14)$$

Im Falle des Abbiegemanövers fährt das Ego-Fahrzeug zunächst mit konstanter Geschwindigkeit weiter, bevor die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Kurvengeschwindigkeit  $v_{turn}$  bis zur Kreuzungs-

einfahrt reduziert wird. Die darauf folgende, den Gleichungen (10) und (12) entsprechende Wegstrecke wird schließlich mit der konstanten Kurvengeschwindigkeit befahren. Hieraus ergibt sich die für die Manöverausführung erforderliche Zeit zu:

$$t_{ME,turn} = \frac{2d_{Ego}s_{AS} - v_{Ego}^2 + v_{turn}^2}{2d_{Ego}v_{Ego}} + \frac{v_{Ego} - v_{turn}}{d_{Ego}} + \frac{s_{ME,turn}}{v_{turn}} + t_D \quad (15)$$

Die Kurvengeschwindigkeit ergibt sich dabei aus der Annahme einer maximalen Querbeschleunigung und dem Radius der Trajektorie zu

$$v_{turn} = \sqrt{a_{y,max} \cdot R} \quad (16)$$

Diese Gleichung kann näherungsweise auch für die Betrachtung der sich aus „Vorrang Süd“ ergebenden Anforderungen herangezogen werden. Für die erforderliche Sensorreichweite nach vorne und hinten ergibt sich:

$$R_{x,front} = s_{AS} + v_{Ego} \cdot t_D + \frac{l}{2} \quad (17)$$

$$R_{x,rear} = (v_{Object} - v_{turn}) \cdot t_{ME} + \frac{l}{2} \quad (18)$$

### 4.3.3 Flächenbelegung

Als Sicherheitskriterium für die Manöverausführung wird definiert, dass die einzelnen Kreuzungsquadranten und die jeweilige Kreuzungsausfahrt während der Manöverausführung durch das Ego-Fahrzeug nicht durch andere Objekte belegt sind. Hieraus ergibt sich als Mindestanforderung an die Sensorik, dass diese mindestens die einzelnen Flächen abdeckt.

### 4.3.4 Ermittelte Sensoranforderungen

Für die Ermittlung der Sensoranforderungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Ego-Fahrzeug:  $l=4,8$  m;  $w=2$  m;  $a_v=2$  m/s<sup>2</sup>;  $d_{Ego}=-3$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{y,max}=4$  m/s<sup>2</sup>
- Für die Abstände des Ego-Fahrzeugs zum Ende des Sicherheitskorridors  $d_{S,x}$  und  $d_{S,y}$  werden jeweils die größtmöglichen Abstände gewählt.<sup>9</sup>
- Fahrzeuggeschwindigkeiten:  $v_{Ego}=50$  km/h;  $v_{Object}=70$  km/h (aus Richtung Norden, Osten und Westen);  $v_{Object}=50$  km/h (aus Richtung Süden)

Mit diesen Annahmen ergeben sich die in Tabelle 6 aufgeführten maximalen Manöverausführungszeiten sowie die erforderlichen Sensorreichweiten für die beiden betrachteten Extremfälle in Tabelle 7. Hierbei sind jeweils die untere ( $R_{x,min}/R_{y,min}$ ) und obere Grenze ( $R_{x,max}/R_{y,max}$ ) des zu erfassenden Bereichs, bezogen auf den Mittelpunkt des Ego-Fahrzeugs angegeben.

<sup>9</sup> Bsp.: Zur Ermittlung von  $d_{S,y}$  bis zum linken Rand von Q<sub>3</sub> wird angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug auf dem rechten der beiden Fahrstreifen mit maximaler Exzentrizität bewegt. Hierdurch ergibt sich  $d_{S,y}=13$  m.

Tabelle 6: Zuordnung der für den jeweiligen Informationsbedarf maximalen Dauer für die Manöverausführung

Informationsbedarf	Am Gate		Vor Gate	
	$t_{ME,max}$	Manöver	$t_{ME,max}$	Manöver
Vorrang Norden	5,1 s	Linksabbiegen ab I,L	7,2 s	Linksabbiegen
Vorrang Osten	5,3 s	Kreuzen ab I,E	7,2 s	Linksabbiegen
Vorrang Süden	3,9 s	Rechtsabbiegen ab I,R	4,9 s	Rechtsabbiegen ab I,R
Vorrang Westen	5,3 s	Kreuzen ab I,E	7,2 s	Linksabbiegen

Tabelle 7: Aus der Analyse des Kontextwissens am Gate abgeleitete Sensorreichweiten

Informationsbedarf	Reichweite $R_x$		Reichweite $R_y$	
	Am Gate	Vor Gate	Am Gate	Vor Gate
Signal der Lichtsignalanlage	7 m	32 m	-3 m bis 3 m	
Vorrang Norden	9-108 m	62-170 m	2-10 m	
Vorrang Osten	9-16 m	55-62 m	-110 m	-160 m
Vorrang Süden	-57 bis 2 m	-33 bis 51 m	- 3 m	
Vorrang Westen	2-9 m	48-55 m	117 m	167 m
Belegung $Q_1$	9-16 m	55-62 m	-2 m bis 2 m	
Belegung $Q_2$	9-16 m	55-62 m	13 m	
Belegung $Q_3$	2-9 m	48-55 m	13 m	
Belegung $Q_4$	2-9 m	48-55 m	-2 m bis 2 m	
Belegung $Q_5$	2-9 m	48-55 m	-2 m bis 2 m	
Belegung Ausfahrt	lateral	9-16 m	55-62 m	13-18 m
	longitudinal	16-21 m	62-67 m	-2 m bis 2 m

Für den im folgenden Abschnitt durchgeführte Bewertung der Eignung unterschiedlicher Sensorprinzipien und –ausführungen lassen sich aus den obigen Größen die entsprechenden Vergleichsgrößen ableiten. Die für die Bewertung von Kameras relevante Größe ist hierbei die Auflösung der TTS der sich nähernden Verkehrsobjekte, die gemäß dem zuvor definierten Sicherheitskriterium mindestens der  $t_{ME}$  entsprechen muss, aus der Änderung der Bildgröße in den ermittelten Entfernungen  $R_{x,max} / R_{y,max}$ . Für reichweitenbasierte Umfeldsensoren lassen sich der maximale Azimut  $\phi_{max}$  und die maximale Sensorreichweite  $d_{max}$  über einfache trigonometrische Beziehungen berechnen. Beide Kennwerte werden auf den Fahrzeugmittelpunkt (center) und auf den Mittelpunkt der vorderen und hinteren Fahrzeugbegrenzung (end) bezogen berechnet, um mögliche Sensorpositionen am Fahrzeug abzubilden:

$$\phi_{\max,center} = \arctan\left(\frac{R_{y,\max}}{R_{x,\min}}\right) \text{ und } \phi_{\max,end} = \arctan\left(\frac{R_{y,\max}}{R_{x,\min} - \frac{l}{2}}\right) \quad (19)$$

$$d_{\max,center} = \sqrt{R_{x,\max}^2 + R_{y,\max}^2} \text{ und } d_{\max,end} = \sqrt{\left(R_{x,\max} - \frac{l}{2}\right)^2 + R_{y,\max}^2} \quad (20)$$

Hieraus ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Werte für die maßgebenden Anforderungen, die alle anderen mit einschließen. Zur vollständigen Abdeckung des rechts neben dem Ego-Fahrzeug befindlichen Bereichs wird eine Unterteilung für den vorderen und hinteren Bereich vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass der erforderliche Azimut mit der Annäherung an die Kreuzung und das Gate zunimmt, während die erforderliche Reichweite aufgrund der geringeren Manöverausführungsdauer abnimmt. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.3 ermittelten Ausrichtung des Fahrzeugs am Gate, vergrößert sich der für den am Gate ermittelten Azimut um den maximalen Ausrichtungswinkel  $\alpha_{l,E,\max}$  zur Deckung des Informationsbedarfs „Vorrang Westen“.

Tabelle 8: Maximaler Azimut und maximale Sensorreichweite

Informationsbedarf	Am Gate				Vor Gate			
	$\phi_{\max,center}$	$d_{\max,center}$	$\phi_{\max,end}$	$d_{\max,end}$	$\phi_{\max,center}$	$d_{\max,center}$	$\phi_{\max,end}$	$d_{\max,end}$
Vorrang Osten	85°	111 m	86°	111 m	71°	172 m	72°	171 m
Vorrang Süden vorne	90°	4 m	90°	3 m	90°	51 m	90°	49 m
Vorrang Süden hinten	90°	57 m	90°	59 m	90°	33 m	90°	35 m
Vorrang Westen	89°+48°	117 m	90°+48°	117 m	74°	176 m	75°	175 m

Die einem Kreuzungsszenario innerhalb geschlossener Ortschaften entsprechende Betrachtung mit den Geschwindigkeiten  $v_{Ego}=50$  km/h und  $v_{Obstacle}=70$  km/h zeigt jedoch auch, dass die erforderlichen Sensorreichweiten zur Deckung des Informationsbedarfs „Vorrang Osten“ und „Vorrang Westen“ aufgrund zu erwartender baulicher Sichtbehinderungen nur selten dargestellt werden können. Dies bedeutet, dass die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers in den Situationen, in denen der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs das Einbiegen oder Kreuzen auf eine übergeordnete Straße beauftragt, nicht vermieden werden kann. Aufgrund der gemäß der RASSt einzuhaltenden und auf das Sichtfeld des Fahrers bezogenen Sichtweiten an Knotenpunkten<sup>10</sup> kann der Fahrer in diesen Situationen jedoch vor Erreichen des Gates die Entscheidung in kooperativer Weise treffen.

## 5 Analyse und Bewertung heutiger Umfeldsensorik

In Tabelle 9 sind die Eigenschaften und Ausführungsvarianten heute am Markt verfügbarer Umfeldsensoren aufgeführt, die die Grundlage der nachfolgenden Eignungsbewertung bilden.

<sup>10</sup> Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h beträgt die einzuhaltende laterale Sichtweite in einer Entfernung von 5 m zur Kreuzungseinfahrt 70 m. (RASSt 06, S.124)

Tabelle 9: Eigenschaften und Ausführungsvarianten verschiedener Sensorprinzipien

		Radar	Lidar	Kamera	3D-ToF	Ultraschall
<b>Sensorprinzip</b>						
Primäre Messungen	Position	+	+	-	+	+
	Geschwindigkeit	+	-	-	-	-
	Helligkeitsmuster	-	+	+	+	-
Detektion von	Objekt	+	+	+	+	+
	Fußgänger/Fahrradfahrer	+	+	+	+	+
	Fahrbahnmarkierung	-	(+)	+	(+)	-
	Verkehrszeichen	-	-	+	-	-
	Lichtsignalanlage	-	-	+	-	-
	Borde	-	+	+	+	+
<b>Kennwerte existierender Ausführungsvarianten</b>						
Reichweite	30/60/250 m (SR/MR/LR)		200 m	70 m	70 m	3 m
Azimut	120 °/60°/20° (SR/MR/LR)		110°	55°	18°	120°
Elevation	13°/4°(SR/ LR)		3°	30°	52°	60°

Tabelle 10: Bewertung der Eignung verschiedener Informationsquellen

Informationsbedarf	Umfeldsensorik					Karten	
	Radar	Lidar	Kamera	3D-ToF	Ultraschall	Digitale Karte	Erweiterte digitale Karte
<b>Situationswissen</b>	-	-	+	-	-	(+)	+
<b>Gate-Lokalisierung</b>	-	+	+	+	-	(+)	(+)
<b>Kontextwissen</b>	+	+	(+)	(+)	-	-	-

Zur Deckung des aus dem Situationswissen abgeleiteten Informationsbedarfs decken die Kamera und die erweiterte digitale Karte, in der die erforderlichen Informationen wie beispielsweise die Position von Lichtsignalanlagen eingetragen sind, alle Anforderungen. Ein Nachteil digitaler Karten

---

ist jedoch deren Aktualität sowie die Genauigkeit der Positionsbestimmung des Ego-Fahrzeugs über GPS<sup>11</sup>, die innerhalb bebauter Gebiete zusätzlich durch Mehrwegeausbreitungen verschlechtert werden kann. Der Nachteil der Kamera liegt in der begrenzten Reichweite, die bei höheren Geschwindigkeiten, bspw. an Kreuzungen außerhalb geschlossener Ortschaften, nicht ausreichend ist. Eine vielversprechende Lösung bietet daher die Kombination aus einer einfachen digitalen Karte, die eine grobe Abschätzung zur beispielsweise der Kreuzungseinfahrt ermöglicht, und einer Kamera, die den restlichen Informationsbedarf abdeckt und deren Umfelddaten zur Plausibilisierung der Kartendaten verwendet werden. Eine ähnliche Bewertung ergibt sich für die aus der Gate-Lokalisierung abgeleiteten Anforderungen, wobei die digitale Karte nur wenige Informationen liefern kann. Für die Realisierung des Kontextwissens eignen sich von den heute am Markt verfügbaren Umfelddatensensoren insbesondere Radar und Lidar, wobei die Vorteile des Lidar-Sensors in dem größeren Azimut sowie der besseren Detektion von Fußgängern und Fahrradfahrern liegen. Als herausfordernd wird die Abdeckung des rechten Seitenbereichs neben dem Fahrzeug angesehen. Ultraschallsensoren sind aufgrund der geringen Reichweite und der prinzipbedingten Fahrgeschwindigkeitsbegrenzung alleine nicht geeignet. Die seitliche Positionierung einer Kamera oder eines Lidar-Sensors erscheint schwierig und im Falle des Lidar-Sensors aufgrund der geringen Elevation für eine flächendeckende Erfassung nicht ausreichend. Eine Lösung könnte die Fusion mehrerer an der Fahrzeugseite positionierter Kameras<sup>12</sup> oder eine in der Dachkante positionierte 3D-ToF-Lichtleiste bieten. Die Eignung von Kamera und 3D-ToF zur Abdeckung des Fahrzeugfrontbereichs ist aufgrund der heutigen Auflösungen von Automotive-Kameras beschränkt. Aktuelle Entwicklungen, beispielsweise im Bereich der Unterhaltungselektronik, lassen jedoch in naher Zukunft kostengünstige und leistungsgesteigerte Lösungen erwarten.

Abschließend ist anzumerken, dass auch am Gate eine Entscheidung durch die Automation aufgrund von Sichtverdeckungen nicht immer möglich ist. Hierzu zählen beispielsweise Linksabbiegesituationen, in denen die entgegenkommenden Fahrzeuge voreinander abbiegen oder die Sichtverdeckung an der Kreuzungseinfahrt durch ein auf dem benachbarten Fahrstreifen wartendes Fahrzeug. Gerade in diesen Situationen wird jedoch der Vorteil des kooperativen Ansatzes von CbW gegenüber vollautomatisierten Fahrzeugführungskonzepten deutlich, da der Fahrer in den beschriebenen Situationen jederzeit selbst die Entscheidung treffen kann und somit den zeitaufwändigen Entscheidungsprozess der Automation verkürzt.

---

## 6 Fazit und Ausblick

---

Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz erlaubt eine Top-down-Analyse der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire. Die am Beispiel einer Kreuzung demonstrierte Methode lässt sich auf beliebige Situationen zunehmender Komplexität übertragen. Die Ergebnisse dieser Analyse haben einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung der Systemarchitektur und das

---

<sup>11</sup> Bei ungestörtem Empfang und günstiger Satellitenkonstellation ist eine Positionsbestimmung mit 10-20 m Genauigkeit möglich [15], S. 602

<sup>12</sup> Ähnlich dem bei BMW in Serie verfügbarem Surround-View

---

---

Sicherheitskonzept eines zukünftig angestrebten Prototypenfahrzeugs in dieser frühen Konzeptphase und liefern einen wichtigen Beitrag zur Bewertung der technischen Realisierbarkeit von Conduct-by-Wire. Der Erkenntnisgewinn ist dabei nicht nur für die Realisierung von Conduct-by-Wire, sondern auch für die Entwicklung neuer Fahrerassistenzfunktionen von Bedeutung.

---

## 7 Danksagung

---

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) als Teil des Forschungsprojekts „Von Conduct-by-Wire zu einer kooperativen Fahrzeugführung: Erweiterung und Validierung eines Konzepts für kooperative, manöverbasierte Fahrerassistenz“ (WI 3153/2-2) gefördert.

---

## 8 Literatur

---

- [1] Hummel, T.; Kühn, M.; Bende, J.; Lang, A.: Advanced Driver Assistance Systems. An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany. German Insurance Association Insurers Accident Research, Research report FS 03, 2011.
- [2] Flemisch, F. O.; Adams, C. A.; Conway, S. R.; Goodrich, K. H.; Palmer, M. T.; Schutte, P. C.: The H-Metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction. NASA/TM-2003-212672. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2003.
- [3] Winner, H.; Heuss, O.: X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In: Winner, H.; Landau, K. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug 2005. Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft. Stuttgart, 2005.
- [4] Kauer, M.; Schreiber, M.; Bruder, R.: How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 20.-24. Juni 2010 in San Diego, 2010.
- [5] United Nations (Hrsg.): Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr. 8. November 1968, Wien, Österreich, 1968.
- [6] Geyer, S.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.: Development of a Cooperative System Behavior for a Highly Automated Vehicle Guidance Concept based on the Conduct-by-Wire Principle. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011s.
- [7] Hakuli, S.; Geyer, S.; Winner, H.; Henning, J.: Integriertes Konzept für die manöverbasierte Fahrerassistenz. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Band 03/2011, S. 220-223, 2011.
- [8] Kauer, M.; Franz, B.; Schreiber, M.; Bruder, R.; Geyer, S.: User acceptance of cooperative maneuver-based driving – a summary of three studies. In: Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, Band 41, Nr. 1, S. 4258-4264, 2012.
- [9] Urmson, C. et al.: Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. In: Journal of Field Robotics, Band 25(8), S. 425-466, 2008.
- [10] Kuehn, M.; Hummel, T.; Bende, J.: Benefit Estimation of Advanced Driver Assistance Systems for Cars Derived from Real-Life Accidents. 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles ESV 2009. 15.-18. Juni 2009 in Stuttgart, 2009.
- [11] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice. In: Safety Science, Band 45, Nr. 9, S. 952-979, 2007.
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASSt 06. 2010.
- [13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Straßenverkehrs-Ordnung. 2010.

- 
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA. 2010.
- [15] Kleine-Besten, T.; Kersken, U.; Pöchmüller, W.; Schepers, H.: Navigation und Telematik. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.