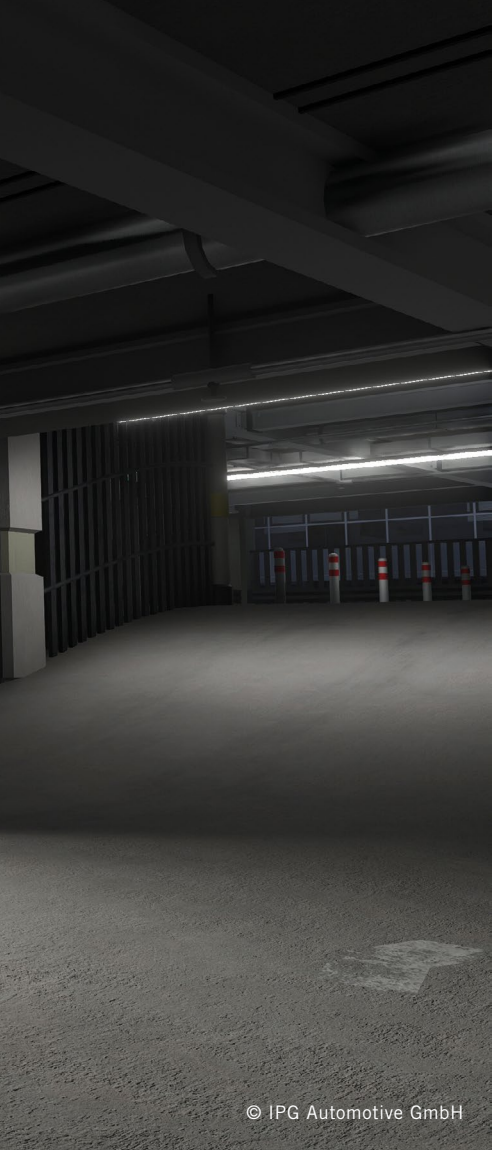
Automatisiertes Valet-Parking – Simulationsbasierte Fahrschlauchabsicherung eines Trajektorienplaners

Niedriggeschwindigkeitsfunktionen für Pkw, wie das automatisierte Parken im Parkhaus (Valet-Parking), sind bereits seit einigen Jahren in der Fahrzeugentwicklung verbreitet. Hier beschreiben die Technische Universität Darmstadt und IPG Automotive den Test der Fahrschlauchabsicherung eines Trajektorienplaners. Basierend auf einer globalen Referenztrajektorie berechnet dieser lokale Teiltrajektorien und fährt sie anschließend ab. Die Erprobung des Konzepts erfolgt simulationsbasiert anhand eines Anforderungs- und Szenarienkatalogs.

Wenn vom autonomen Fahren (SAE-Level 5) die Rede ist, sind die ersten Assoziationen oftmals Robotertaxis in der Innenstadt, die ein automatisiertes Fahren ohne menschliche Fahraufgabe ermöglichen. Tatsächlich sind es aber mit hoher Wahrscheinlichkeit Niedriggeschwindigkeitsfunktionen der SAE-Level 2+, 3 und 4, die als erstes Serienreife erlangen werden.

Zum Langsamfahrbereich zählt auch das automatisierte Valet-Parking [1], auf das in diesem Artikel näher eingegangen wird. Dabei verlässt der Fahrer nach der Einfahrt in ein Parkhaus das Fahrzeug. Anschließend fährt das Fahrzeug automatisiert zu dem ihm zugewiesenen Parkplatz und parkt dort ein. Dazu wird eine Kommunikation mit dem Parkhaus aufgebaut, sodass das Fahrzeug Informationen darüber erhält, an welcher Position im Parkhaus ein freier Parkplatz zur Verfügung steht. Nach der Aufforderung durch den Fahrer (dem Ende der Parkzeit) parkt das Fahrzeug selbstständig wieder aus und fährt automatisiert zum Eingang des Parkhauses zurück.

Die geplante Wegführung des Fahrzeugs wird als globale Trajektorie bezeichnet, während der Bereich, den das Fahrzeug beim Abfahren dieser Trajektorie durchfährt, unter dem Begriff Fahrschlauch bekannt ist. Die simulationsbasierte Absicherung dieses Fahrschlauchs


© IPG Automotive GmbH

VERFASST VON

Bo Sun
ist Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt.

Moritz Berghöfer
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt.

Dr.-Ing. Sami Bilgic Istoc
ist Consultant bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.

Henning Kemper
ist Specialist Editor bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.

bildet den Schwerpunkt des vorliegenden Artikels. Dabei wird die globale Trajektorie, etwa von der Parkhauseinfahrt bis zum Zielparkplatz, als gegeben angenommen. Seitens des Fahrzeugs erfolgt eine Umgebungswahrnehmung sowie eine darauf aufbauende lokale Trajektorienplanung [2] und Fahrzeugregelung unter Berücksichtigung dynamischer Objekte wie Fußgänger oder Fremdfahrzeuge. Die Planung der lokalen Trajektorie wird vom sogenannten Low-Level-Trajektorienplaner vorgenommen.

Durch den Test in der Simulation ist es möglich, eine sehr große Anzahl von Szenarien und Anforderungen in kurzer Zeit reproduzierbar zu testen – dies ist entscheidend, um die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer in allen denkbaren Situationen zu gewährleisten. Dadurch wird eine hohe Testtiefe und eine hohe Testbreite erreicht. Die Reproduzierbarkeit stellt dabei ein Schlüsselelement dar. Die Szenarien sind zufällig variierbar, wobei jedes zufällig erzeugte Szenario beliebig oft unter identischen Rahmenbedingungen simuliert werden kann. Dies ermöglicht die kontinuierliche Weiterentwicklung von automatisierten Fahrfunktionen.

ANFORDERUNGEN UND TESTSZENARIEN

Im Rahmen des in diesem Artikel beschriebenen Projekts der Technischen Universität Darmstadt und IPG Automotive zur Fahrschlauchabsicherung wurden beispielhafte Anforderungen abgeleitet und definiert. Diese lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: die funktionalen Anforderungen und die Sicherheitsanforderungen.

Die funktionalen Anforderungen umfassen Aspekte wie die Trajektorienaktualisierung. Wenn das Egofahrzeug das vom Trajektorienplaner vorgegebene Trajektoriensegment vollständig abgefahren hat oder wenn ein kritisches Objekt erkannt wird und mit der aktuellen Trajektorie zu kollidieren droht, wird die Trajektorie entsprechend angepasst. Da das Egofahrzeug stets auf das – hinsichtlich der Kollisionsgefahr – kritischste Objekt reagieren soll, muss darüber hinaus zwischen kritischen und unkritischen Objekten differenziert werden.

Die Sicherheitsanforderungen betreffen beispielsweise die Notbremsfunktion. Sobald der Abstand zwischen dem Egofahrzeug und einem Objekt einen vordefinierten Wert unterschreitet, wird die Verzögerung auf -4 m/s² erhöht. Eine weitere Anforderung ist, dass das Egofahrzeug einem vorausfahrenden Fahrzeug mit gleicher Geschwindigkeit folgen können muss. Falls aufgrund eines kritischen Objekts eine Verzögerung erforderlich ist, sollte diese den Fahrkomfort außerdem so wenig wie möglich beeinträchtigen.

Während des Projekts wurde die Fahrfunktion exemplarisch in den Szenarien 1 bis 5 getestet, **BILD 1**. Jedes Testszenario diente dabei dem Nachweis der Erfüllung einer entsprechenden Anforderung. Dabei wurde geprüft, ob das Egofahrzeug im jeweiligen Szenario entsprechend den Anforderungen reagiert.

Im Szenario 1 wird eine Neuplanung der Trajektorie erforderlich, da die ursprünglich geplante globale Trajektorie wegen zuvor unbekannter statischer Objekte nicht mehr wie geplant befahrbar ist. In diesem konkreten Fall wird die Weiterfahrt des Egofahrzeugs durch einen Karton (blaues Quadrat) auf der geplanten Trajektorie verhindert. Im Szenario 2 befinden sich in der Umgebung des Egofahrzeugs mehrere kritische Objekte, die dementsprechend in die Fahrschlauchabsicherung einzubeziehen sind. Die Identifizierung des kritischsten Objekts ist dabei eine Voraussetzung für die entsprechende Anpassung der lokalen Trajektorie. Im Szenario 3 wird eine Notbremsung erforderlich, da sich ein Objekt in der Nähe des Egofahrzeugs befindet und sich auf dieses zubewegt, woraufhin ein kritischer Abstand erreicht wird. Das Szenario 4 bildet eine

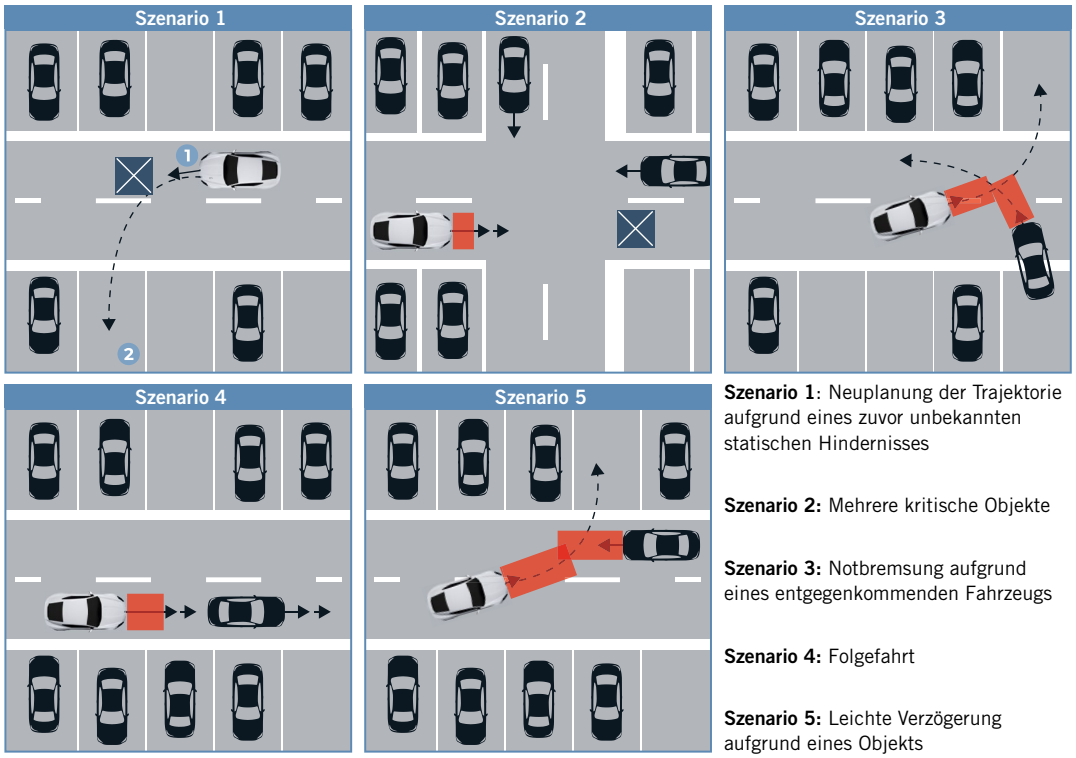


BILD 1 Test der Fahrfunktion in fünf verschiedenen Einparkszenarien (© Technische Universität Darmstadt, IPG Automotive GmbH)

Szenario 1: Neuplanung der Trajektorie aufgrund eines zuvor unbekannten statischen Hindernisses

Szenario 2: Mehrere kritische Objekte

Szenario 3: Notbremsung aufgrund eines entgegenkommenden Fahrzeugs

Szenario 4: Folgefahrt

Szenario 5: Leichte Verzögerung aufgrund eines Objekts

Folgefahrtsituation ab, in der ein Objekt dem Egofahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen mit konstanter Geschwindigkeit vorausfährt. Das letzte Szenario 5 erfordert aufgrund eines entgegenkommenden Objekts eine leichte Verzögerung des Egofahrzeugs.

IMPLEMENTIERUNG IN DER SIMULATION

Die Absicherungs- und Regelungsfunktionen wurden über einen mehrstufigen Aufbau in die offene Integrations- und Testplattform CarMaker von IPG Automotive integriert. Für die eigentliche Einregelung der Fahrzeugsolltrajektorie kam das Trajectory-Driver-Add-on von CarMaker zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen integrierten Trajektorienregler, der es ermöglicht, das Egofahrzeug auf eine räumlich und zeitlich definierte

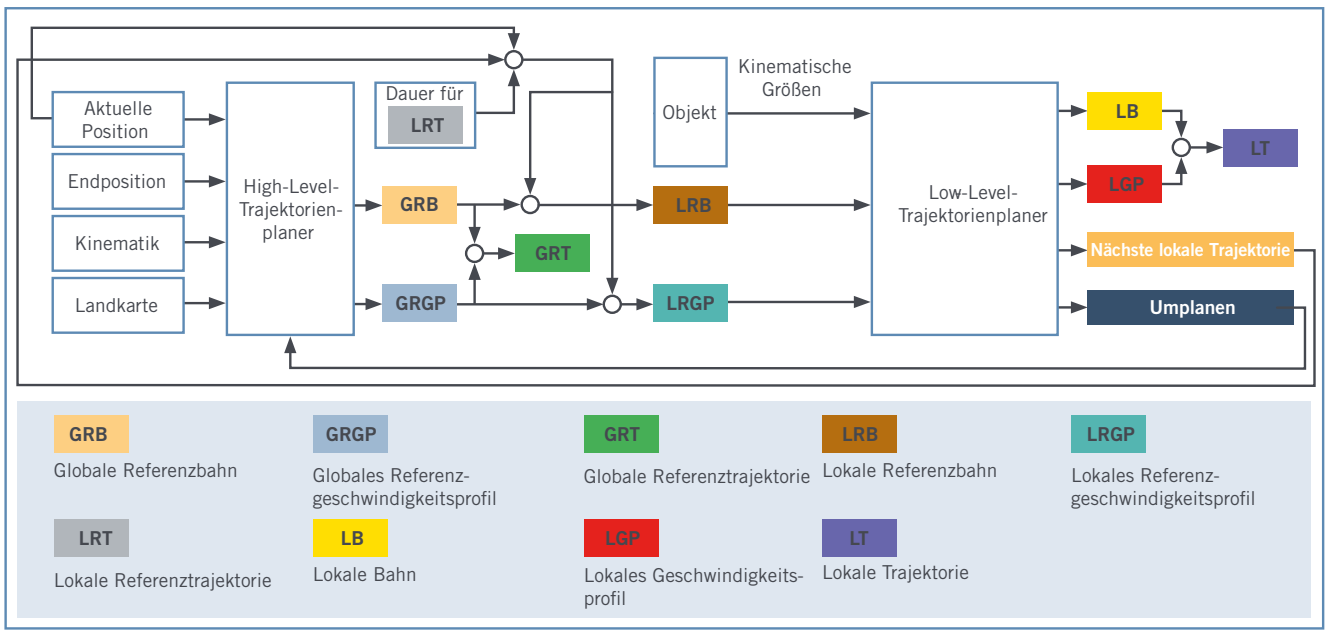


BILD 2 Gesamtstruktur des Trajektorienplaners (© Technische Universität Darmstadt, IPG Automotive GmbH)

BILD 3 Szenario im Parkhaus: Vordefinierte Trajektorie (blau) und tatsächlich vom Egofahrzeug abgefahrene Trajektorie (orange)
(© Technische Universität Darmstadt, IPG Automotive GmbH)

Solltrajektorie einzuregeln. Darüber hinaus erlaubt der Regler dynamische Aktualisierungen der Trajektorie während der Simulation. Als Eingaben werden die räumliche Trajektorie in Längs- und Querrichtung sowie der Verlauf der Sollgeschwindigkeit erwartet. Der Regler bildet somit die Schnittstelle zwischen den eigentlichen Fahrpedal-Bremse-Lenkungs-Vorgängen im virtuellen Fahrzeug und dem Low-Level-Trajektorienplaner in Form der Absicherungs- und Regelungsfunktion für die dynamische Trajektorie.

Der Low-Level-Trajektorienplaner selbst wurde in der Programmiersprache C++ entwickelt und über die entsprechende Schnittstelle direkt in CarMaker integriert. Der eigentliche Prozess der Trajektorienplanung wird in diverse Modi unterteilt. Diese umfassen zum Beispiel eine Notbremsung, eine Umplanung der lokalen Trajektorie aufgrund eines neu detektierten Hindernisses oder das Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs. **BILD 2** zeigt die Gesamtstruktur des Trajektorienplaners.

Der High-Level-Trajektorienplaner ist für die Planung der gesamten globalen Trajektorie zuständig – unter Berücksichtigung von Informationen aus einer zuvor bekannten hochgenauen Karte. Hierbei werden dementsprechend ausschließlich die statischen und dynamischen Objekte berücksichtigt, die in der Karte enthalten sind. Der Low-Level-Trajektorienplaner hingegen generiert eine dynamische beziehungsweise lokale Trajektorie unter Einbeziehung der zuvor unbekannten statischen und dynamischen Objekte auf Basis der simulierten Umgebungsdaten. Die lokale Trajektorie mit den kinematischen Parametern wird für die nächsten 5 s vorausgeplant und entweder nach 5 s oder bei Änderungen der Umgebungsbedingungen – sogenannten Triggern – sofort neu geplant.

Wenn eine der Triggerbedingungen der Modi während des Abfahrens der lokalen Trajektorie erfüllt ist, wird der entsprechende Umplanungsmodus aktiviert und eine aktualisierte lokale Trajektorie generiert. Falls beispielsweise eine Kollision zwischen dem Egofahrzeug und unbekannten statischen oder dynamischen Objekten entlang der lokalen Trajektorie berechnet wird, muss je nach Kritikalität der Notbrems- oder Verzögerungsmodus eingeleitet werden. Grundlegend wichtig ist dabei die korrekte Definition der Priorität sämtlicher Modi.

Mithilfe des Trajectory-Driver-Add-ons können die vordefinierte Trajektorie und die tatsächlich vom Egofahrzeug abgefahrene Trajektorie in verschiedenen Farben in der 3-D-Visualisierungsumgebung IPGMovie dargestellt werden, **BILD 3**.

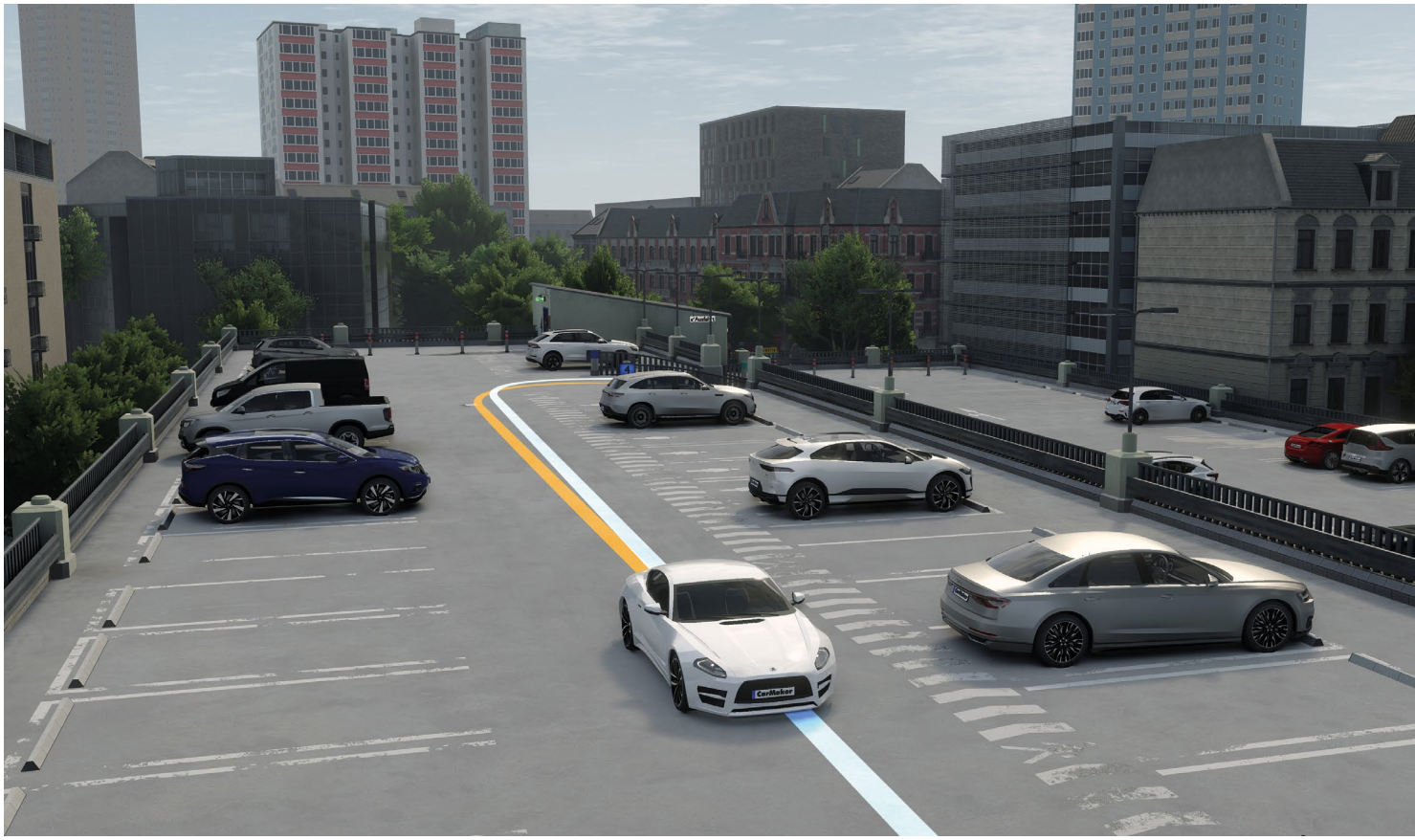


BILD 4 Testszenario auf Parkhaus inklusive vom Egofahrzeug (weiß) abgefahrener Trajektorie (© Technische Universität Darmstadt, IPG Automotive GmbH)

Nach der Implementierung der Trajektorienregelung und -planung sind für die Durchführung der Simulation darüber hinaus Testszenarien erforderlich. Deren Modellierung erfolgt wie üblich im Scenario Editor von CarMaker. Das Egofahrzeug sowie gegebenenfalls weitere Verkehrsteilnehmer, beispielsweise Fremdfahrzeuge oder Fußgänger, werden dafür in einer Parkhausumgebung angeordnet und mit definierten Bewegungspfaden versehen, **BILD 4**. In diesem Fall ist das Egofahrzeug ein generisches Beispielfahrzeug, da das Fahrzeug selbst nicht Gegenstand der Untersuchungen ist. Die statische Trajektorie wird über die C++-Schnittstelle von CarMaker zum Simulationsstart eingelesen. Die weiteren Objekte folgen den im Scenario Editor vordefinierten Routen.

ERGEBNISSE

Die Fahrzeugregelung erweist sich aufgrund der Gesamtsystemarchitektur auch für vermeintlich einfache Aufgaben als anspruchsvoll. Unbekannte Faktoren wie Beschleunigungs- und Bremsfähigkeiten, Lenkleistungsvermögen und mögliche Startverzögerungen beeinflussen die Fähigkeit, der Solltrajektorie zu folgen. Dies führt zu Abweichungen zwischen der Endposition des Fahrzeugs nach 5 s und dem Endpunkt der über 5 s vorausgeplanten lokalen Solltrajektorie. Wenn die Startposition des Fahrzeugs für das darauffolgende Intervall nicht mit dem entsprechenden Abschnitt der Referenztrajektorie übereinstimmt, kann es zu erheblichen Abweichungen und Regelungsinstabilitäten kommen. Im schlimmsten Fall endet dies in einem Überschwingen der Lenkung sowie eventuell daraus resultierenden Kollisionen.

Die diskreten Modi zur lokalen Trajektorienplanung erweisen sich ebenfalls als Herausforderung für die stabile Fahrzeugregelung. Beispielsweise dann, wenn das Fahrzeug verzögert, um einem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Auch hier kann es zu überschwingendem Verhalten aufgrund von Totzeiten kommen, die durch die diskreten Modi verursacht werden – in diesem Fall in Längsrichtung, wenn der Regler des Egofahrzeugs in CarMaker stärker bremst als geplant. Im ungünstigsten Fall wechselt das Fahrzeug permanent zwischen den Modi, woraus eine zickzackförmige Geschwindigkeitskurve resultieren kann.

Eine Vorhersage der Fahrschläuche von Objekten ist sehr schwierig, wenn als Basisinformationen lediglich der aktuelle Winkel sowie die Geschwindigkeit dieser Objekte zur Verfügung stehen. Ursächlich dafür ist, dass die Objekte ihre Geschwindigkeit beziehungsweise Winkelgeschwindigkeit nicht konstant halten. Insbesondere Fußgänger haben einen großen Einfluss auf die Trajektorie des Fahrzeugs, da deren Bewegungen nur sehr schwer vorhersehbar sind. Die erheblichen Abweichungen führen zu fehlerhaften Reaktionen des Egofahrzeugs.

BEWERTUNG UND FAZIT

Ausgehend von einer gegebenen Referenztrajektorie hat IPG Automotive eine

vollständige lokale Trajektorienregelung sowie eine dynamische Fahrschlauchabsicherung für das Einsatzgebiet des Valet-Parkings in die Simulationsplattform CarMaker implementiert und darin getestet. Dabei zeigte sich im Projekt, dass die Auswahl der Regelungsstrategie einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hinsichtlich Sicherheit und Komfort aufweist – unter anderem in Bezug auf die Vorhersage der Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer. Insbesondere die Bewegungen von Fußgängern erwiesen sich als schwer vorhersehbar und führten oftmals zu kritischen Situationen.

Der Einsatz der Simulation ermöglicht es, kritische Situationen und konzeptuelle Probleme, die mit herkömmlichen Testmethoden erst in späteren Projektphasen erkannt worden wären, bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess zu identifizieren. Um diese Ergebnisse künftig noch weiter zu verbessern, liegt ein Schwerpunkt der zukünftigen Forschung auf der verbesserten Vorhersage der Bewegung des Umfelds sowie einer darauf aufbauenden robusten und sicheren Regelung.

LITERATURHINWEISE

[1] Banzhaf, H.; Nienhüser, D.; Knoop, S.; Zöllner, J. M.: The future of parking: A survey on automated valet parking with an outlook on high density parking. In: 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Los Angeles, USA, S. 1827-1834, doi: 10.1109/IVS.2017.7995971

[2] Guo, Y.; Guo, Z.; Wang, Y.; Yao, D.; Li; B.; Li, L.: A Survey of Trajectory Planning Methods for Autonomous Driving – Part I: Unstructured Scenarios. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, doi: 10.1109/TIV.2023.3337318

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com

ATZ live
FACHKONFERENZEN ZU FAHRZEUG- UND ANTRIEBSENTWICKLUNG

Antriebs- und Fahrzeugtechnik im Gespräch

Zukunftsweisende Fachkonferenzen aus den Themenbereichen

- Gesamtfahrzeug
- Antriebe und Kraftstoffe
- Simulation und Test
- Fahrwerk
- Automatisiertes Fahren
- Fahrzeugakustik
- Elektromobilität und Netzintegration
- Nachhaltigkeit

Jetzt online mehr erfahren!

www.atzlive.de