

# **Automatisches Ausweichen in dynamischer Umgebung für Fahrerassistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung**

Automatic evasion maneuvers in dynamic environments for automotive collision avoidance systems

Jun.-Prof. Dr.-Ing. **Thomas Sattel**, Dipl.-Ing. **Tobias Hesse**, Dipl.-Ing. **Christoph Sondermann-Wölke**, Universität Paderborn

## **Kurzfassung**

Die Weiterentwicklung der maschinellen Umgebungswahrnehmung ermöglicht innovative Fahrerassistenzsysteme, die das Potenzial haben, sowohl den Komfort als auch die Sicherheit beim Fahren mit Kraftfahrzeugen zu erhöhen. Diese Fahrerassistenzsysteme erfordern allerdings auch eine „intelligente“ Informationsverarbeitung, die eine räumliche und zeitliche Vorausschau beinhaltet. Das entwickelte Fahrerassistenzsystem basiert auf einer Methode der potenzialfeldbasierten Fahrzeugführung. In diesem Beitrag werden dazu Ergebnisse aus Versuchsfahrten zur Kollisionsvermeidung mit bewegten Objekten dargestellt. Es werden verschiedene „Einmündungs-Szenarien“ erfolgreich getestet. Den Abschluss dieses Beitrags bildet der Vergleich mit Ergebnissen aus Simulationen.

## **Abstract**

Advances in environmental perception enable innovative driver assistance systems that can increase the comfort and safety of automotive driving. Further, these driver assistance systems depend on an “intelligent” information processing that must include a spatial and temporal look-ahead. Based on a method for potential field vehicle guidance, this paper presents experimental results of an assistance system for collision avoidance with moving objects. Different “junction-scenarios” are tested successfully. The paper concludes with a brief comparison of experimental results with simulations.

## **1. Einleitung**

Die zunehmende Fähigkeit von Kraftfahrzeugen zur maschinellen Umgebungswahrnehmung ermöglicht eine immer bessere Detektion und Klassifikation von Verkehrsobjekten und deren Bewegungszuständen. Für Fahrerassistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung sind neben dieser Kernfähigkeit auch weitere Fähigkeiten erforderlich, die im Rahmen einer „intelligenten“ Informationsverarbeitung potenzielle Gefahrenquellen berücksichtigen und geeignet agieren. Diese Informationsverarbeitung interpretiert die Verkehrssituation, plant das

zukünftige Verhalten, beispielsweise mögliche Ausweichbahnen, trifft Manöver- bzw. Verhaltensentscheidungen und führt das Fahrzeug stabil durch kritische dynamische Verkehrssituationen. Dabei wird ein reaktives Fahrzeugverhalten nicht ausreichend sein, um Kollisionen zu vermeiden. Erst ein räumlich und zeitlich vorausschauendes und vorausdenkendes Kollisionsvermeidungssystem, das die Bewegung der Verkehrsteilnehmer prädiktiv berücksichtigt, stellt einen signifikanten Sicherheitsgewinn dar.

In diesem Beitrag werden Versuchsfahrten und Simulationen mit einem räumlich und zeitlich vorausschauenden Kollisionsvermeidungssystem dargestellt. In Kapitel 2 wird zunächst die Methode der potenzialfeldbasierten Fahrzeugführung beschrieben und der gewählte Ansatz erläutert. Im folgenden Kapitel wird auf die Systemarchitektur des Versuchsfahrzeugs, vor allem auf das Zusammenspiel von Hardware und Software, näher eingegangen. Das vierte Kapitel zeigt die Durchführung und Auswertung der Fahrversuche, bei denen verschiedene Szenarien getestet werden. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Fahrversuche mit denen aus Simulationen verglichen, um somit Aussagen zur frühzeitigen Erprobung des Kollisionsvermeidungssystems innerhalb von Simulationen treffen zu können. Der Beitrag schließt mit einer kurzen Zusammenfassung.

## **2. Potenzialfeldbasierte Fahrzeugführung**

In den eigenen Arbeiten [1]-[6] werden Methoden und Algorithmen zur prädiktiven Manöverplanung bzw. Bahn- und Bewegungsplanung auch unter Integration des Fahrers beschrieben. Die Vorgehensweise erlaubt Spurhalte-, Spurwechsel- oder Kollisionsvermeidungsaufgaben in dynamischen Umgebungen in einem einheitlichen Ansatz zu berücksichtigen. Gegenüber regelbasierten Verfahren ist es das Ziel die Anzahl von Regeln für die Verhaltensgenerierung gering zu halten, um beispielsweise mögliche Inkonsistenzen in den Regeln zu vermeiden. Auf der Basis von Potenzialfeldmethoden wird die aktuelle Fahrsituation über eine dynamische Gefahrenkarte bewertet und eine oder mehrere kollisionsfreie Bahnen berechnet. Um einen durchgängigen methodischen Rahmen zu haben, wird in Anlehnung an das in [7] vorgestellte Regelungskonzept um eine priorisierte Bahn ein Führungspotenzialfeld gelegt. Mit Hilfe dieses Führungspotenzials wird die Querführung realisiert und der notwendige Lenkwinkel  $\delta_{Soll}$  berechnet, um der geplanten Bahn zu folgen.

Im Unterschied zu den bisher vorgestellten Ansätzen wird in diesem Beitrag ein Konzept zur Führung von Kraftfahrzeugen vorgestellt, um eine Kollision autonom zu vermeiden. Innerhalb

der Querführung wird dabei auf einen Lenkradwinkel geregelt, was zur Folge hat, dass dem Fahrzeugführer nicht die Möglichkeit gegeben ist das Fahrzeug zu übersteuern. Darüber hinaus wird auch die Längsführung vom Assistenzsystem übernommen. In allen hier gezeigten Versuchen wurde dabei auf eine konstante Soll-Geschwindigkeit geregelt. Einen Überblick über die verwendete Regelstruktur gibt das Blockschaltbild in Abbildung 1.

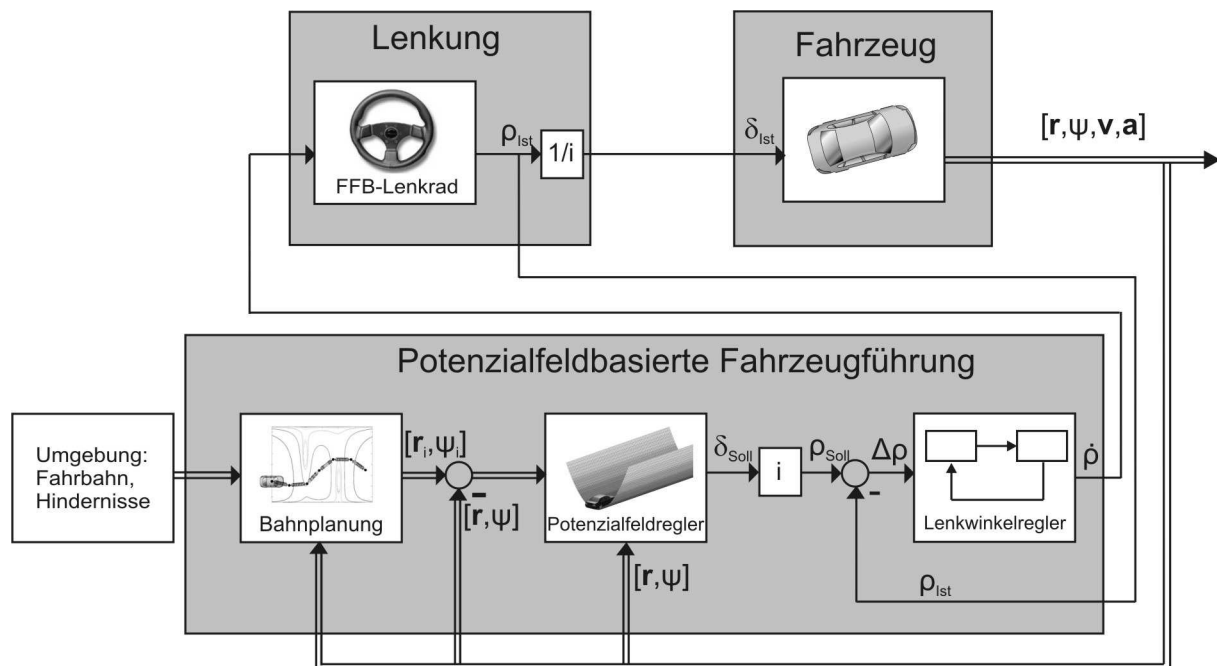


Abbildung 1: Regelstruktur zur potenzialfeldbasierten Fahrzeugführung

Grundlage der potenzialfeldbasierten Fahrzeugführung sind die Daten über die Umgebung wie Fahrbahn und Verkehrsobjekte sowie der eigene Fahrzeugzustand mit der Position  $r$ , dem Gierwinkel  $\psi$ , der Geschwindigkeit  $v$  und der Beschleunigung  $a$ . Ausgehend von diesen Sensordaten wird eine dynamische Gefahrenkarte erstellt. Die bewegten Objekte werden darin ausgehend von den detektierten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen linear extrapoliert. Diese Umfelddaten entstammen einem virtuellen Weltmodell, das auf das Testgelände „projiziert“ wird. Der Vorteil der virtuellen Welt (also virtueller Fahrbahnbegrenzungen und virtueller Verkehrsobjekte) liegt in einem gefahrlosen Erproben des Kollisionsvermeidungssystems. Um die Daten aus der virtuellen Welt zu detektieren, wurde ein virtueller Sensor entwickelt, der an verschiedene Sensorarten und entsprechende Sensoreigenschaften angepasst werden kann.

In die erstellte Gefahrenkarte wird ein Elastisches Band gelegt. Dieses besteht aus masselosen Knoten, die über gedachte Federn verbunden sind. Diese Knoten werden in der Gefahrenkarte in Richtung des Potenzialminimums von den Hindernissen und

Fahrbahnrändern abgestoßen bis sich eine Gleichgewichtslage einstellt. Diese Gleichgewichtslage der Knoten des Elastischen Bandes bildet die kollisionsfreie Bahn  $[\mathbf{r}_i, \psi_i]$  durch den aktuellen Verkehrsraum, vgl. [4],[5].

Die ermittelte Bahn wird an den potenzialfeldbasierten Querführungsregler übergeben, welcher auf dem Konzept von Rossetter und Gerdes [7] basiert und in [8] detailliert beschrieben ist. Dieser Potenzialfeldregler berechnet anhand der lateralen Abweichung  $\Delta y_T$  und der Differenz  $\Delta \psi$  zwischen dem aktuellen Gierwinkel des Fahrzeugs und der Tangente an die geplante Bahn den erforderlichen Soll-Lenkwinkel  $\delta_{Soll}$ . Bei einer gegebenen Lenkübersetzung  $i$  berechnet sich daraus der Soll-Lenkradwinkel  $\rho_{Soll}$ . Über den Vergleich mit dem aktuellen Ist-Lenkradwinkel  $\rho_{Ist}$  stellt der Lenkwinkelregler eine definierte Lenkrate  $\dot{\rho}$  ein, um die Lenkwinkeldifferenz zu minimieren. Der Regler ist lediglich hinsichtlich der Lenkrate beschränkt. Dieser Ansatz wäre für eine kooperative Fahrzeugführung nicht zielführend, da ein vom Fahrer eingebrachtes Lenkmoment ausgeregelt würde.

### 3. Systemarchitektur

Das aufgebaute Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 2 gezeigt. Die Systemarchitektur besteht aus einem abgestimmten Hardware-Software-Konzept. Die im Versuchsfahrzeug installierten Hardware-Komponenten sind in Abbildung 3 inkl. der energetischen und informationstechnischen Anbindung dargestellt. Die Position des Fahrzeugs in der virtuellen Umgebung wird mittels DGPS<sup>1</sup> und Inertialsensorik (IMU<sup>2</sup>) bestimmt. Der DGPS Empfänger hat eine Updaterate von 20Hz und eine nominelle Genauigkeit von 1-2cm, welche durch die Korrekturdaten eines kommerziellen Datendienstes erreicht wird. Neben der aktuellen Position werden auch die aktuelle Geschwindigkeit und Beschleunigung ermittelt. Für die Querregelung wurde ein Lenkmodul entwickelt, welches anstelle des originalen Lenkrads auf die Lenksäule aufgesetzt wird (siehe Abbildung 4). Hauptbestandteile des Lenkmoduls sind ein multi-turnfähige Lenkradwinkelsensor und ein bürstenloser Gleichstrommotor, der über einen Zahnriemen mit der Lenkstange verbunden ist. Der Sensor dient zur exakten Bestimmung des aktuellen Lenkradwinkels, welcher an den Lenkwinkelregler zurückgeführt wird. Die Einstellung des berechneten Soll-Lenkradwinkels erfolgt über den Gleichstrommotor.

---

<sup>1</sup> Differential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

<sup>2</sup> Inertial **M**easuring **U**nit



Abbildung 2: Versuchsfahrzeug

Für die Längsregelung des Versuchsfahrzeugs wird die Aktorik des serienmäßigen Tempomaten über eine eigene Regelung kontrolliert. Dazu wird der vorhandene Stellmotor über einen D/A-Wandler mit dem PC<sup>3</sup> verbunden, um so die Drosselklappenstellung zu beeinflussen. Über den vorhandenen Winkelsensor kann diese Ist-Drosselklappenstellung zurück geführt werden.

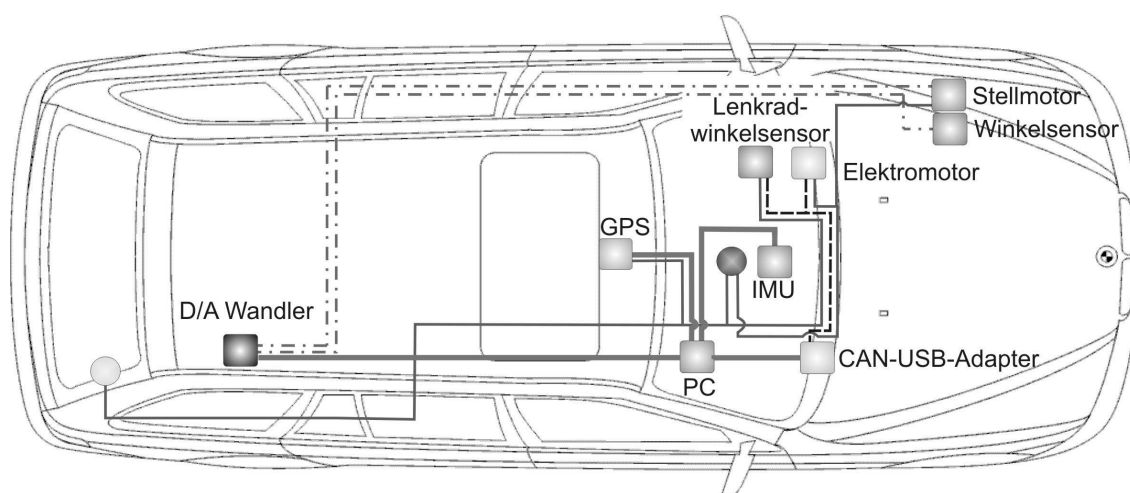
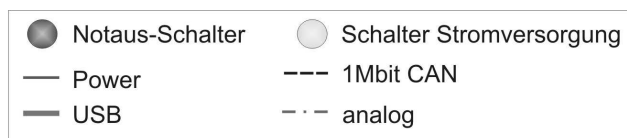


Abbildung 3: Hardware-Struktur im Versuchsfahrzeug

<sup>3</sup> Intel Core 2 Duo Mobile T5500; 2x1,67GHz; 1GB RAM

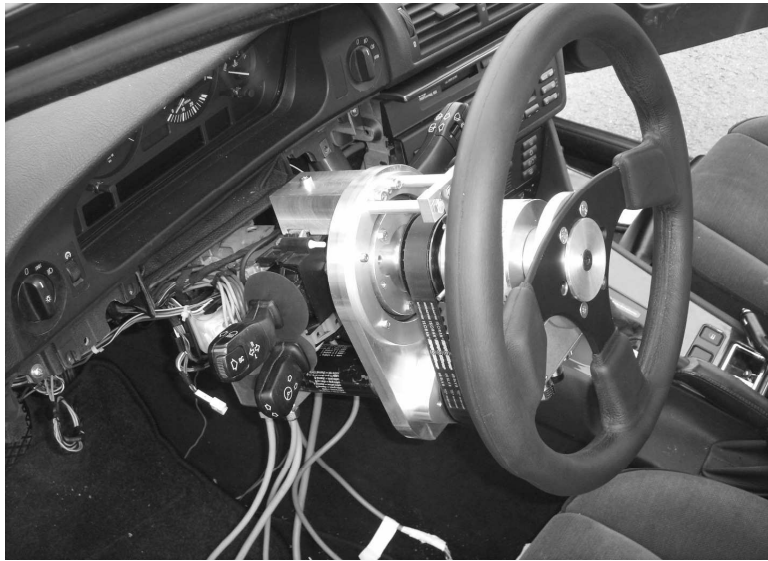


Abbildung 4: Lenkmodul

Die Software-Umgebung SMPL (Straightforward Modular Prototyping Library) [9] steht der Universität Paderborn durch eine Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt zur Verfügung. Zentrale Konzepte von SMPL sind die Modularisierung und der gemeinsame Speicherbereich (shared memory) aller Software-Module. Neue Software-Module können unkompliziert auf diesen shared memory zugreifen und die gewünschten Daten in einen eigenen Datenblock schreiben sowie aus allen existierenden Datenblöcken lesen.

Diese Software-Module können unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die einzelnen Software-Module verarbeiten die Sensorinformationen, berechnen die Ausweichbahn und den benötigten Lenkradwinkel bzw. die Drosselklappenstellung und steuern die Elektromotoren an. Darüber hinaus gibt es Module zum Aufzeichnen der Daten und Visualisierung der Versuchsfahrten.

#### **4. Fahrversuche**

Ziel der durchgeführten Versuche war die Anwendung und Evaluation des entwickelten Konzepts zur potenzialfeldbasierten Kollisionsvermeidung im Versuchsfahrzeug. Die Fahrversuche wurden auf dem Flugplatz Haxterberg in Paderborn durchgeführt. Dort konnte die asphaltierte Start- und Landebahn genutzt werden. Es wurde das in Abbildung 5 dargestellte Einmündungsszenario mit unterschiedlichen Verhaltensweisen des anderen Verkehrsteilnehmers getestet. (In allen drei Fällen befindet sich das eigene Fahrzeug auf der Vorfahrtstraße.)

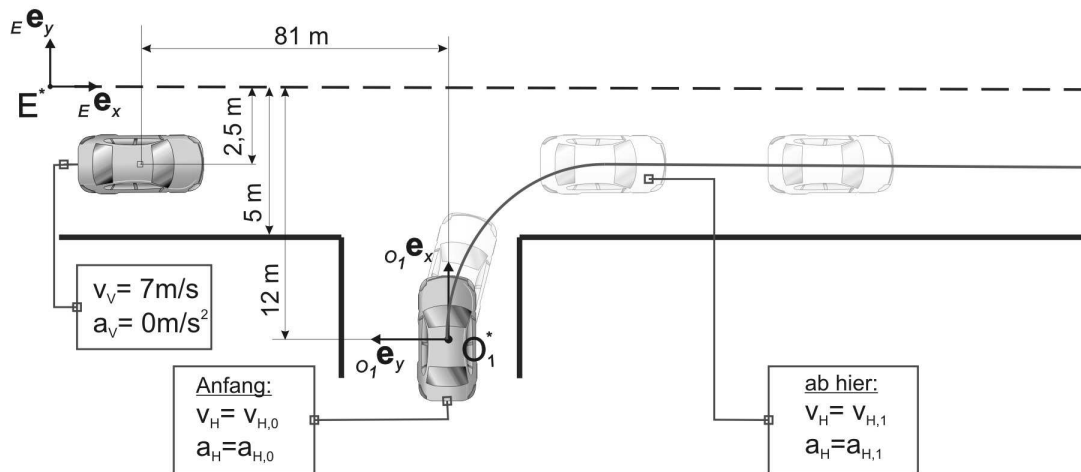


Abbildung 5: Testszenario mit Einmündung

Das eigene Fahrzeug fährt in jeweils mit einer konstanten Geschwindigkeit von etwa 7m/s, während das einbiegende Fahrzeug eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung durchführt. Die Beschleunigung ändert sich in dem Moment, da der Einbiegevorgang beendet ist und es tangential zur Vorfahrtsstraße orientiert ist. Die genauen Anfangsgeschwindigkeiten und Beschleunigungswerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Ausprägungen des Einmündungsszenarios

Testfall	Start- geschwindigkeit	Beschleunigung während Einbiegen	(Geschwindigkeit nach Einbiegen)	Beschleunigung nach Einbiegen
	$v_{H,0}$	$a_{H,0}$	$(v_{H,1})$	$a_{H,1}$
1. Überholen	0,0 m/s	0,25 m/s <sup>2</sup>	(2,7 m/s)	0,0 m/s <sup>2</sup>
2. Folgen	0,0 m/s	0,4 m/s <sup>2</sup>	(3,5 m/s)	4,0 m/s <sup>2</sup>
3. Ausweichen	0,0 m/s	0,2 m/s <sup>2</sup>	(2,4 m/s)	8,0 m/s <sup>2</sup>

Ziel der Tests ist die Demonstration rein lateraler Ausweichmanöver bei konstanter Geschwindigkeit. Je nach Geschwindigkeitspaarung des eigenen und des einbiegenden Fahrzeugs ergeben sich so unterschiedliche Manöver, die notwendig sind, um eine Kollision zu vermeiden. Die Sensorreichweite des virtuellen Sensors und die Planungsdistanz wurden auf 50m eingestellt. Es wurde kontinuierlich vorausgeplant, wobei jeweils nur ein kleiner Bereich der geplanten Bahn abgefahren wird, bevor die Bahn neu geplant wird. Die Bahnplanung wurde hier mit einer Frequenz von etwa 10Hz ausgeführt.

#### 4.1 Testfall 1 – Überholen

In diesem Fall ist die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs höher als die des einbiegenden. Das einbiegende Fahrzeug hält zudem seine Geschwindigkeit nach dem Einbiegevorgang konstant. Daher muss ein Überholvorgang eingeleitet werden, um bei konstanter eigener Geschwindigkeit einer Kollision zu entgehen. Die geplanten Bahnen zu verschiedenen Zeitpunkten sind in Abbildung 6 dargestellt.

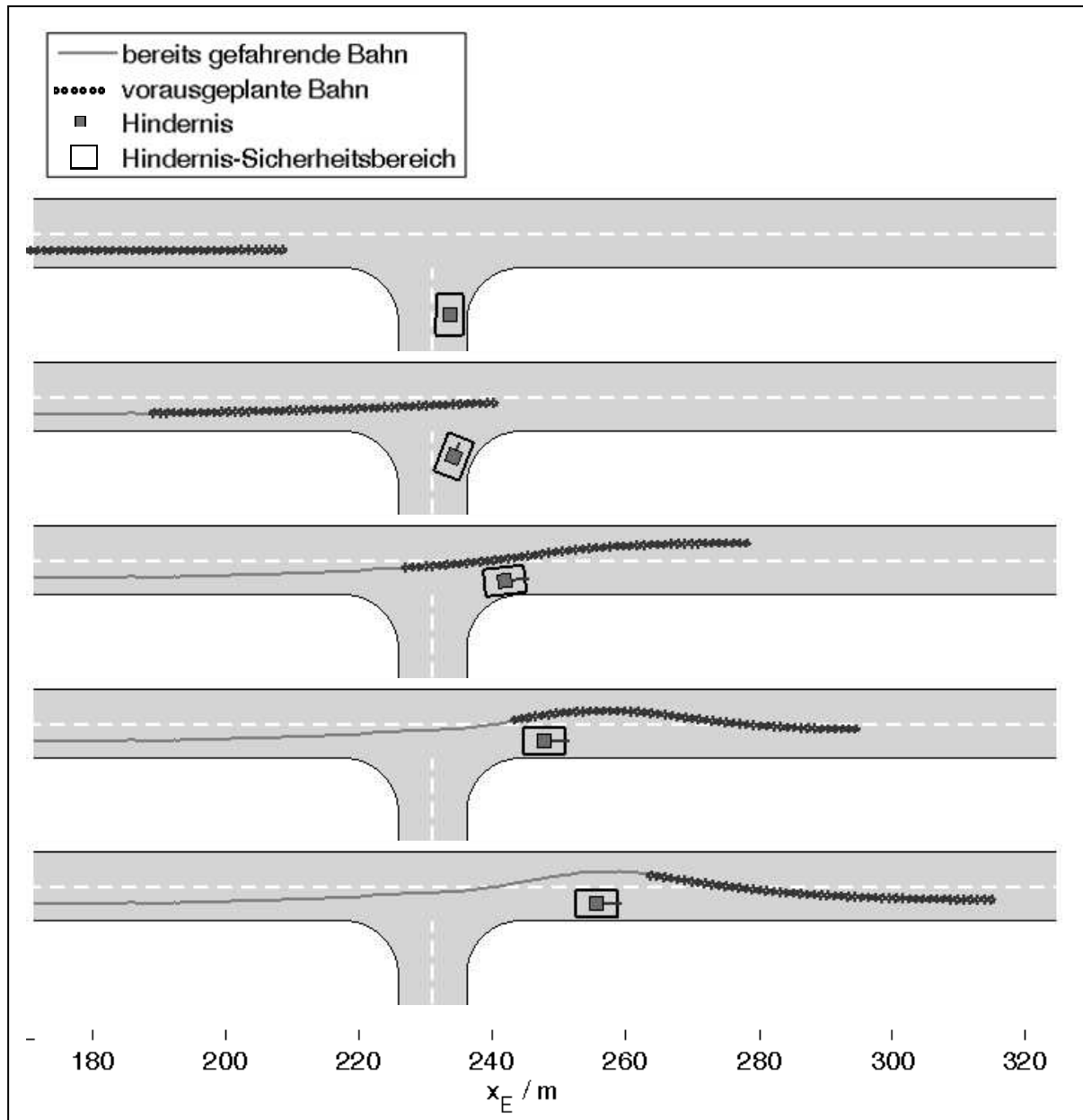


Abbildung 6 Testfall 1 – Geplante Bahnen zu verschiedenen Zeitpunkten



Zu den dargestellten Zeitpunkten befindet sich das eigene Fahrzeug stets am Anfang (hier also am linken Ende) der vorausgeplanten Bahn. Da das eigene Fahrzeug nur durch seinen Schwerpunkt repräsentiert ist, wird das andere Fahrzeug um einen Sicherheitsbereich erweitert. Wenn also die geplante Bahn zu keinem Zeitpunkt im Hindernis-Sicherheitsbereich liegt, dann kommt es beim Abfahren dieser Bahn auch zu keinem Zeitpunkt zu einer Kollision zwischen dem Eigenen Fahrzeug und dem Hindernis.

In Abbildung 6 ist zu sehen, dass das andere Fahrzeug zunächst keinen Einfluss hat, da es sich noch nicht bewegt bzw. noch nicht detektiert wird. Ab dem Beginn des Einbiegevorgangs reagiert die Bahnplanung auf die geschätzte und extrapolierte Bahn des Einbiegenden und plant Ausweichbahnen. Diese Bahnen ändern sich während des Einbiegevorgangs, da angenommen wird, dass das andere Fahrzeug sich geradlinig bewegt und daher die reale von der geschätzten Bewegung abweicht. Die Bahnplanung reagiert auf jede neue Schätzung und passt sich den veränderten Gegebenheiten an. Nach dem Einbiegevorgang ist die Bewegung des anderen Fahrzeugs dann tatsächlich geradlinig (gleichmäßig beschleunigt bzw. hier sogar bei konstanter Geschwindigkeit). Daher wird in dieser Phase die Bewegung bei der Bahnplanung korrekt extrapoliert und es kommt zu keinen sprunghaften Änderungen zwischen zwei aufeinander folgenden geplanten Bahnen.

Abbildung 7 (oben) zeigt die insgesamt geplante Bahn, die sich aus den Stücken der geplanten Bahnen ergibt, die abgefahren und jeweils als Reglereingang genutzt wurden. Da bei der Neuplanung immer von der alten Bahn und nicht von der aktuellen Fahrzeugposition aus weitergeplant wird, ergibt sich ein kontinuierlicher Sollbahnverlauf.

Die bei der Fahrt auftretenden Reglerabweichungen  $\Delta y_T$  (Querabweichung) und  $\Delta \psi$  (Orientierungsabweichung) sind in Abbildung 7 (Mitte) zu sehen. Aufgrund dieser Abweichungen ergibt sich ein vom Regler berechneter Soll-Lenkwinkel, der zusammen mit dem Ist-Lenkwinkel in Abbildung 7 (unten) gezeigt ist. Die sich aus diesem Ist-Lenkwinkelverlauf ergebene tatsächlich abgefahrte Bahn ist zusammen mit der insgesamt geplanten Bahn in Abbildung 7 (oben) zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass die abgefahrte Bahn der geplanten Bahn folgt, es allerdings zu lateralen Abweichungen von bis zu ca. 50cm kommt. Diese Abweichung liegt unter anderem in der Abweichung des Ist-Lenkwinkels vom Soll-Lenkwinkel begründet. Diese Abweichung wiederum hängt an begrenzten möglichen Stellgrößen der Lenkaktorik sowie der begrenzten Regelfrequenz. Es ist aber zu sehen, dass das System insgesamt der vorausgeplanten Bahn folgt.

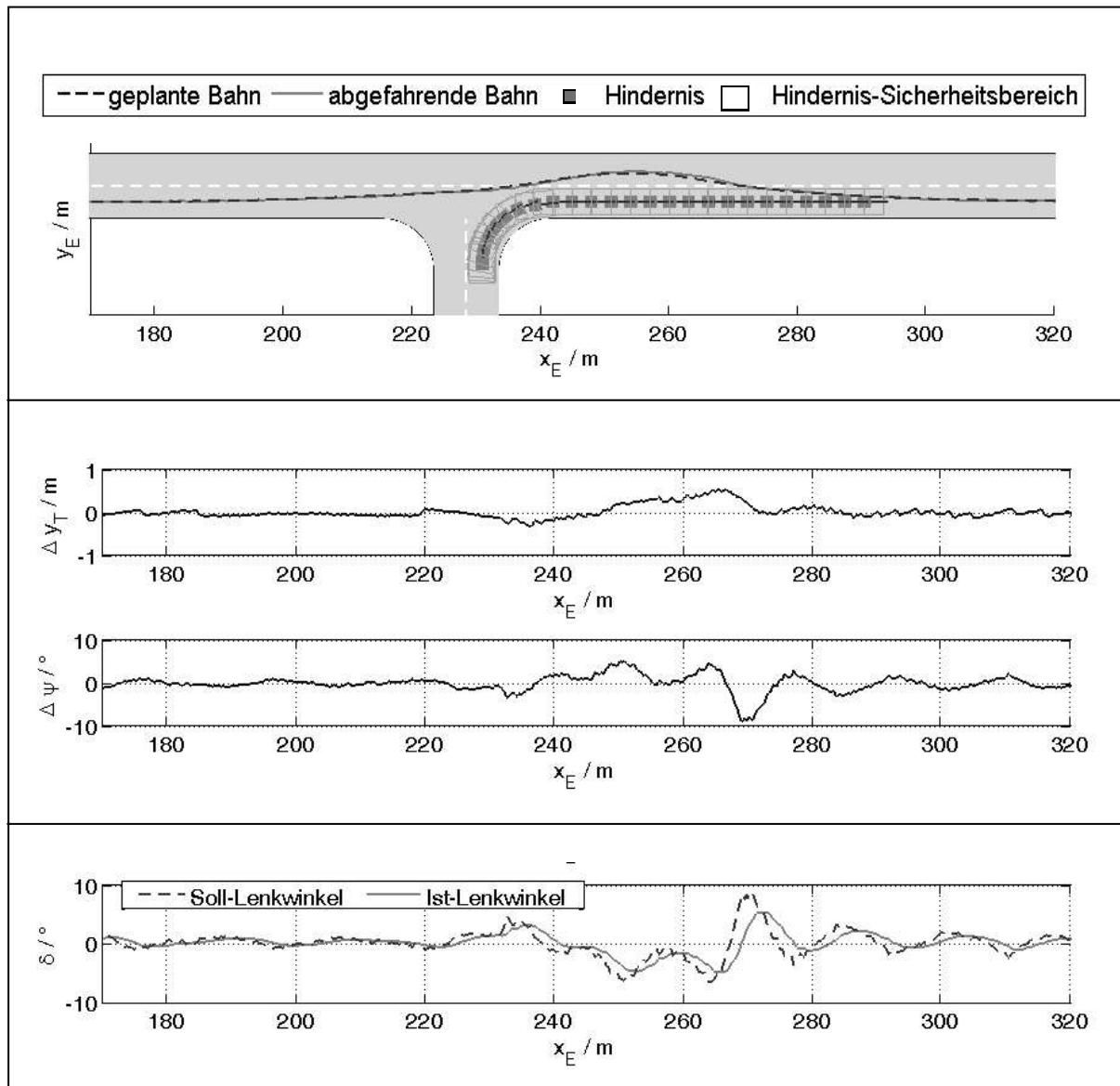


Abbildung 7: Testfall 1 - Geplante und abgefahrene Bahn (oben), Reglerabweichungen (Mitte), Soll- und Ist-Lenkwinkel (unten)

#### 4.2 Testfall 2 – Folgen

In dieser Ausprägung des Szenarios ist das einbiegende Fahrzeug bereits kurz nach dem Einbiegen schneller als das eigene Fahrzeug. Daher ist ein Überholen nicht möglich. Abbildung 8 zeigt die geplanten Bahnen zu verschiedenen Zeitpunkten. Diese befinden sich stets in der eigenen Fahrspur. Und führen so im Endeffekt zu einer reinen Spurhalteassistentz, die eingreift, sobald das eigene Fahrzeug die Mitte der rechten Fahrspur verlässt. Dieses Ergebnis ist sinnvoll, da das einbiegende Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt so

schnell ist bzw. so stark beschleunigt, dass es das eigene Fahrzeug voraussichtlich nicht behindert. Daher ist es nicht notwendig, die geplante Bahn für das eigene Fahrzeug anzupassen. Lediglich während des Einbiegevorgangs reagiert die Bahnplanung leicht, Abbildung 8 (2. von oben), da die Bewegung des einbiegenden Fahrzeugs hier auch linear extrapoliert wird.

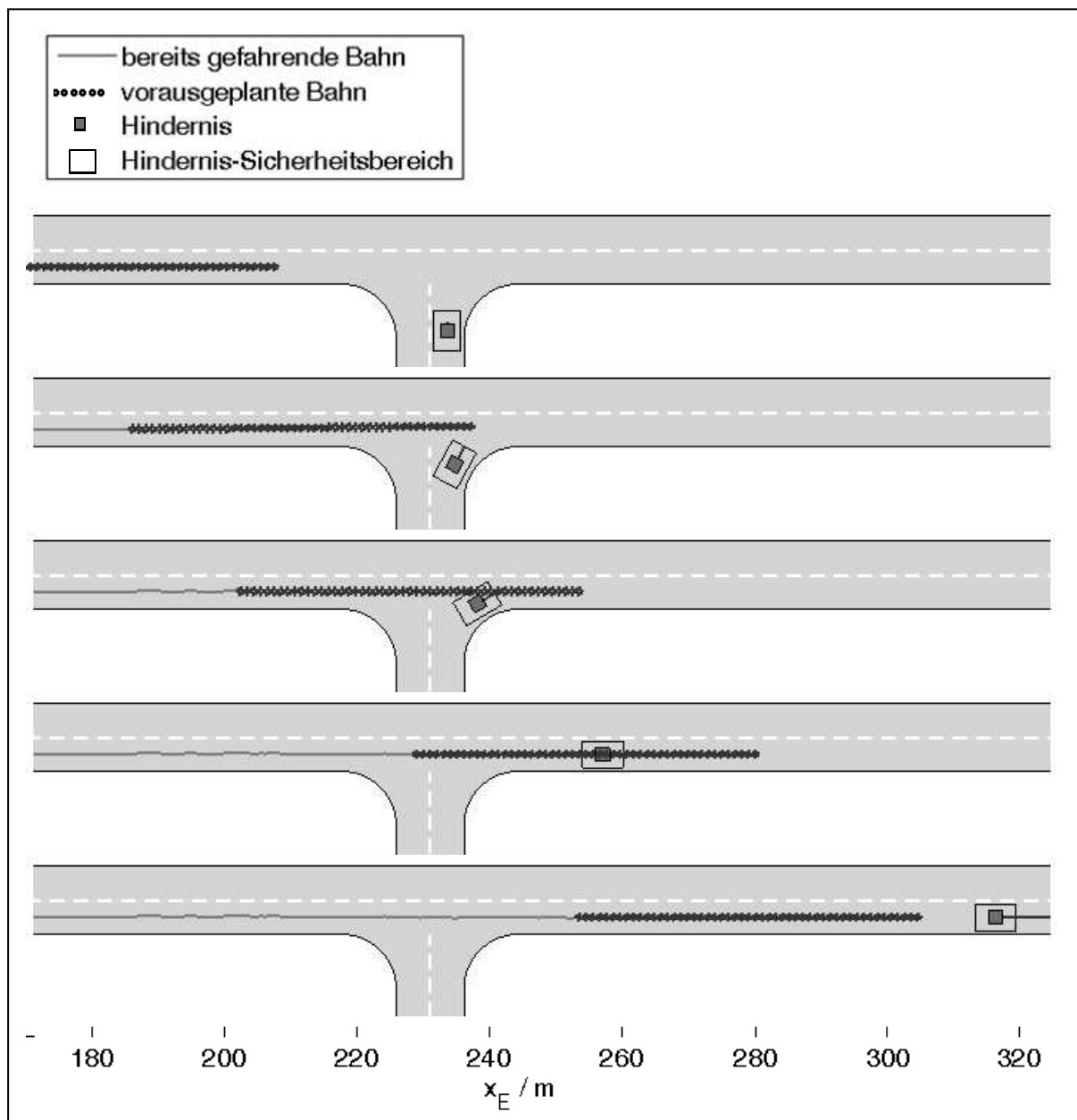


Abbildung 8: Testfall 2 - Geplante Bahnen zu verschiedenen Zeitpunkten

#### 4.3 Testfall 3 – Ausweichen

Bei der dritten Ausprägung des Testszenarios biegt das andere Fahrzeug zunächst sehr langsam ein, so dass zunächst eine Ausweichbahn geplant wird, siehe Abbildung 9 (2., 3. von oben). Sobald der Einbiegevorgang beendet ist, beschleunigt es allerdings so stark, dass der Überholvorgang abgebrochen wird. Entlang der geplanten Bahnen wird das eigene Fahrzeug jetzt wieder auf die rechte Fahrspur zurückgeführt und bleibt hinter dem Einbieger.

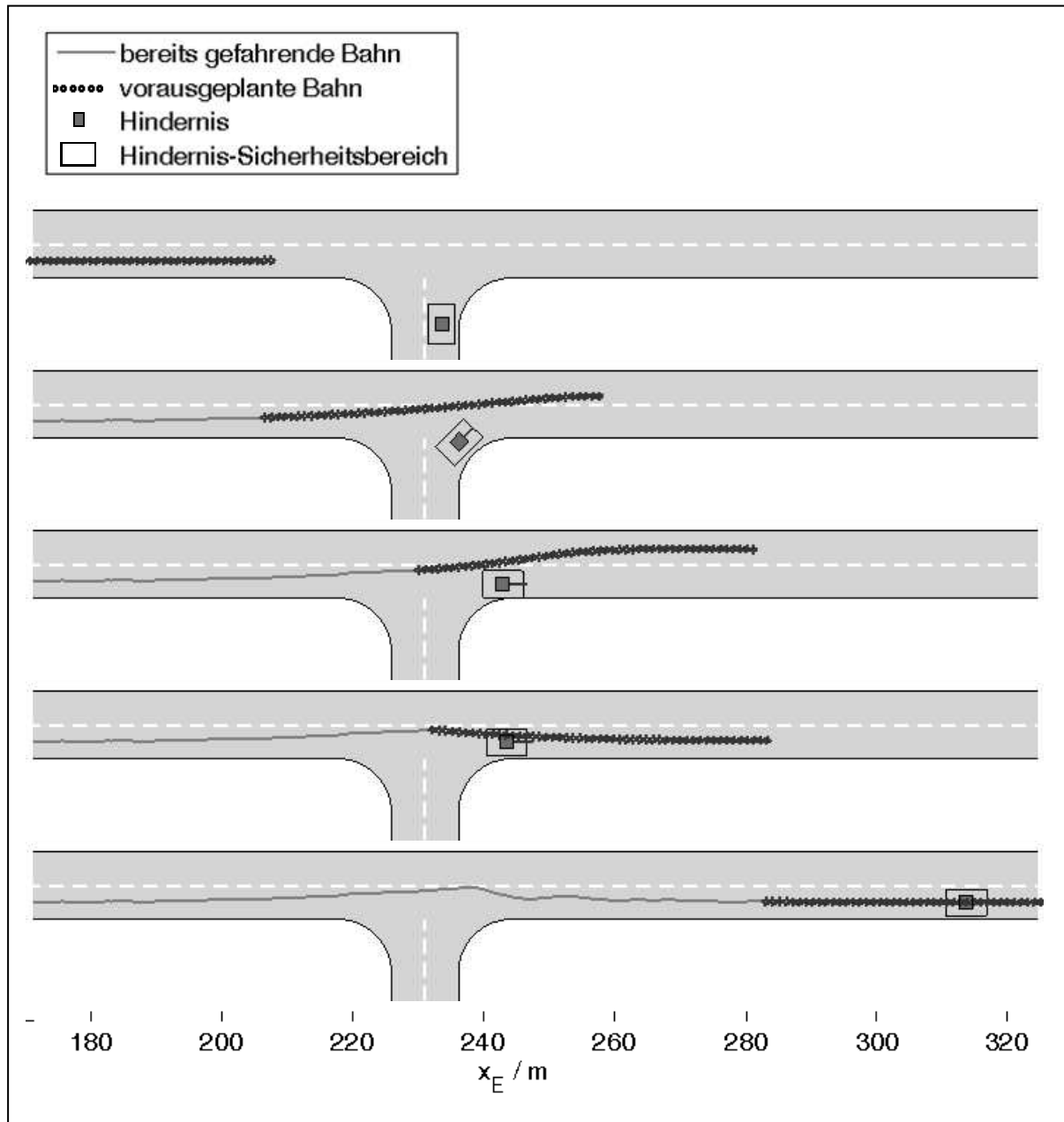


Abbildung 10 Testfall 3 – Geplante Bahnen zu verschiedenen Zeitpunkten

## 5. Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse von Fahrversuch und Simulation

Anhand der ersten vorgestellten Ausprägung des analysierten Szenarios sollen die experimentellen Ergebnisse mit Simulationsdaten verglichen werden. Wie Abbildung 11 zeigt stimmen sowohl die geplante Sollbahn als auch die abgefahrene Bahn insgesamt sehr gut überein.

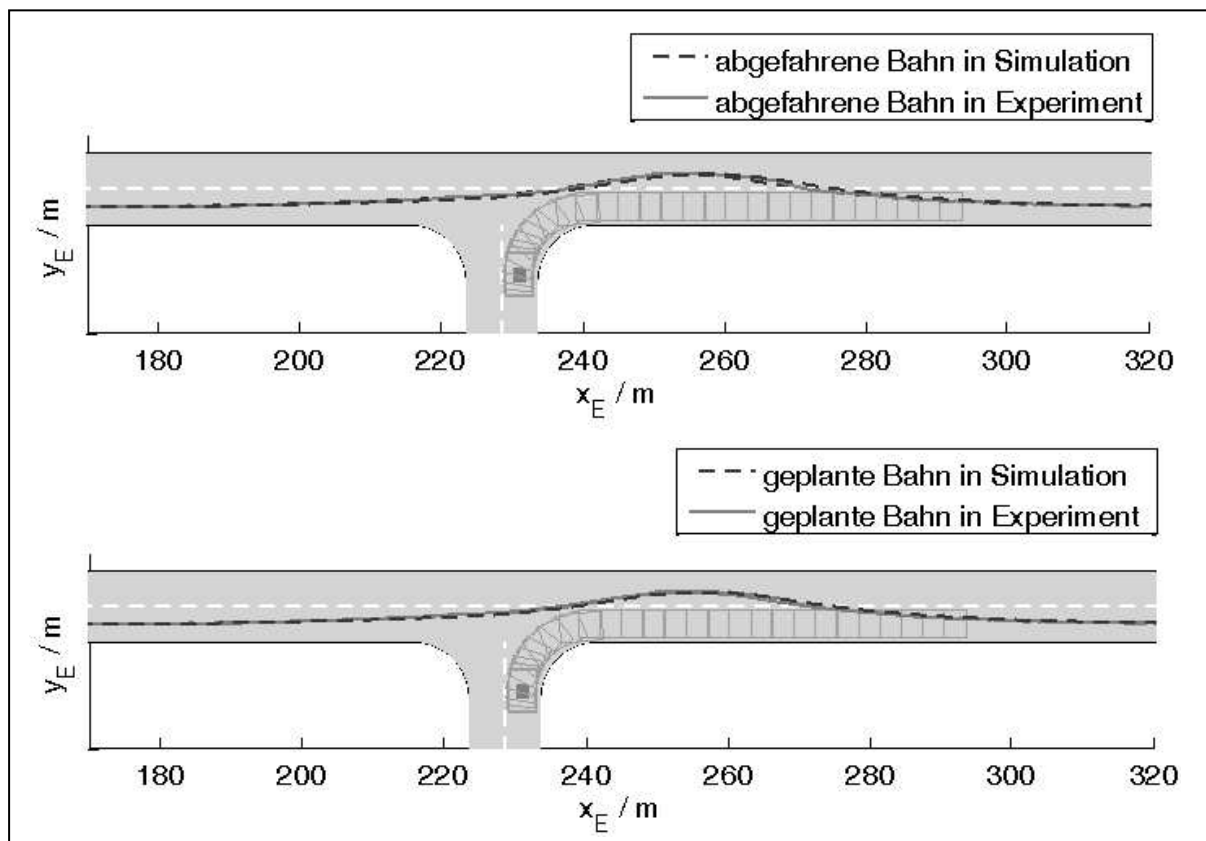


Abbildung 11: Testfall 1 - Geplante und abgefahrene Bahn in Simulation und Experiment im Vergleich

Die kleinen Unterschiede zwischen Simulation und Experiment werden anhand der Reglerabweichungen deutlich, die in Abbildung 12 dargestellt sind. Bezüglich der Querabweichung  $\Delta y_T$  stimmt zwar der Trend überein, aber während in der Simulation eine maximale Querabweichung von ca. 10cm nicht überschritten wird, liegt die maximale Querabweichung im Experiment mit ca. 50cm deutlich höher.

Bei der Orientierungsabweichung  $\Delta \psi$  ist die Größenordnung in Simulation und Experiment fast vergleichbar. Allerdings zeigt sich, dass es im Experiment beim Wiedereinschwenken auf die rechte Fahrspur zu leichten Schwingungen kommt. Diese sind in der Simulation nicht zu beobachten.

Diese größeren Abweichungen schlagen sich dann im Experiment wiederum in größeren Soll-Lenkswinkeln nieder.

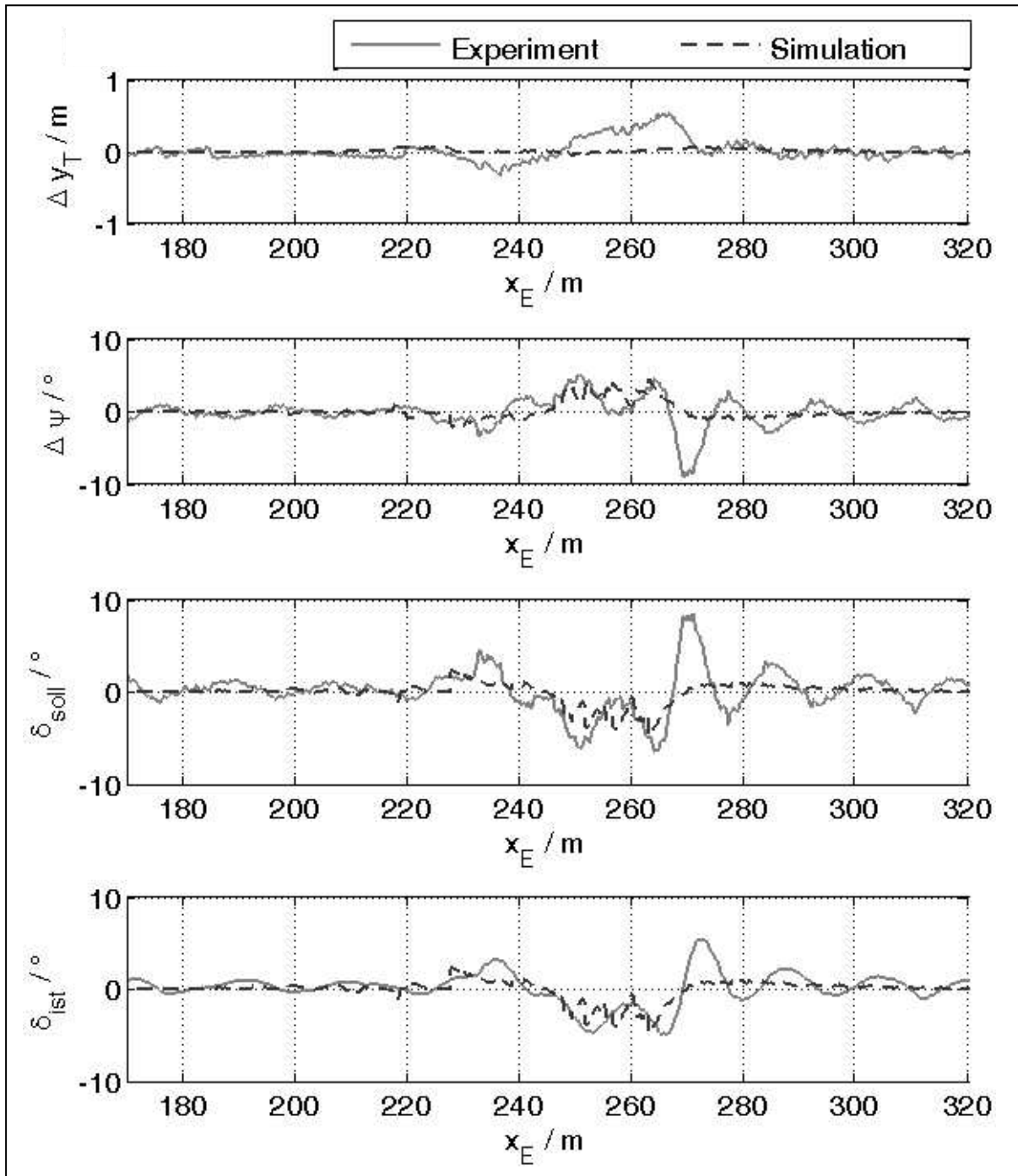


Abbildung 12: Testfall 1 - Geplante und abgefahrene Bahn in Simulation und Experiment im Vergleich

Der Grund für die Abweichungen liegt in Unzulänglichkeiten des Modells begründet, da der Querregler und die Bahnplanung sowie das (ohnehin virtuelle) Hindernismodell identisch waren. Neben anderen nicht modellierten Effekten und Störgrößen ist vor allem kein Lenkungsmodell vorhanden und die Simulation basiert auf der Annahme eines perfekten unterlagerten Lenkwinkelreglers, so dass in der Simulation der Soll- und Ist-Lenkwinkel identisch sind. Da dies in der Realität nicht zu erreichen ist, kommt es in der Folge zu den beobachteten Abweichungen.

## **6. Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurden Fahrversuche mit einem Fahrerassistenzsystem zur Kollisionsvermeidung dargestellt. Das aufgebaute Versuchsfahrzeug mit flexibler Softwarearchitektur bietet die Möglichkeit Testfahrten mit dem entwickelten Kollisionsvermeidungssystem durchzuführen. Reale Umfeldsensorik wurde durch eine virtuelle Welt und virtuelle Umfeldsensorik ersetzt, um gefahrlose Tests zu gewährleisten.

Zum ersten Mal wurde experimentell gezeigt, dass mit dem Ansatz der potenzialfeldbasierten Fahrzeugführung Kollisionen mit bewegten Hindernissen vermieden werden können. Darüber hinaus ist die Methode aufgrund der ständigen Neuplanung und der Extrapolation der Verkehrsobjekte in Lage auch Verhaltensänderungen der anderen Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen. Dies wurde an den gezeigten Einmündungsszenarien verdeutlicht.

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der Fahrversuche mit denen aus Simulationen verglichen. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der geplanten und abgefahrenen Bahnen festgestellt. Unterschiede gab es in den Lenkwinkeln, da in der Simulation aktuell kein Lenkungsmodell vorhanden ist.

## Literatur

- [1] Brandt, T.; Sattel, T.; Wallaschek, J., [2005], *Zur integrierten Längs- und Querführung von Kraftfahrzeugen in Notsituationen*, VDI-Berichte 1892: Mechatronik 2005 Innovative Produktentwicklung, Bd. 2, S. 779-808, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2005, ISBN 3-18-091892-6
- [2] Sattel, T.; Brandt, T., [2005], *Ground Vehicle Guidance along Collision-Free Trajectories using Elastic Bands*, 2005 American Control Conference (ACC), Portland, Oregon, USA, June 10, ISBN: 0-7803-9099-7, pp. 4991-4996
- [3] Sattel, T.; Brandt, T., [2006], Ein Beitrag zur interaktiven Querführungsassistenz von Kraftfahrzeugen, Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme - 22. Internationale VDI/VW Gemeinschaftstagung, Wolfsburg, 12.-13. Oktober 2006
- [4] Brandt, T.; Sattel, T.; Wallaschek, J., [2006], *On automatic collision avoidance systems*, SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Electronic and Electric Systems, ISBN 0-7680-1693-2, Februar 2006, pp. 431-441
- [5] Sattel, T.; Brandt, T., [2007], From Robotics to Automotive: Lanekeeping and collision avoidance based on elastic bands, *Vehicle System Dynamics*, Int. Journal, i. E.
- [6] Brand, T.; Sattel, T.; Böhm, M., [2007], *Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lanekeeping and collision avoidance maneuvers*, IEEE Int. Vehicle Symposium, Istanbul, June 13-15, ISBN: 1-4244-1068-1, pp. 582-587
- [7] Rossetter, E.J.; Gerdes, J.C., [2002], *A Study of Lateral Vehicle Control Under a 'Virtual' Force Framework*, Proceedings of the 2002 International Symposium on Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan
- [8] Sattel, T.; Brandt, T., [2006] A note on vehicle guidance control using a mechanical analogy. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 6(1), S. 841-842
- [9] Schindler, J.; Flemisch, F. O., [2007] Prospektive Gestaltung von Fahrzeugautomation: Agile Prototypenentwicklung im DLR-SmpLab. *MMI-Interaktiv* 13, S.175-177