

## Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. 808

Dipl.-Ing. Martin Keller,  
Castrop-Rauxel

## Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr





# Fortschritt-Berichte VDI

## Reihe 12

## Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Martin Keller,  
Castrop-Rauxel

**Nr. 808**

# Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr

VDI verlag

Keller, Martin

## **Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 808. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

140 Seiten, 66 Bilder, 9 Tabellen.

ISBN 978-3-18-380812-0, ISSN 0178-9449,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Trajektorienplanung – Trajektorienoptimierung – Kollisionsvermeidung – Fahrdynamikregelung – Positionsregelung – Trajektorienregelung – Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme – Automatisierte Fahrfunktionen – Emergency Steering Assist – Modellprädiktive Regelung

Um die Unfallzahlen im öffentlichen Straßenverkehr zu senken, werden zusätzlich zu den klassischen Fahrstabilisierungssystemen neuartige Fahrerassistenzsysteme benötigt, die neben fahrdynamischen Größen auch Informationen über das Fahrzeugumfeld in die Funktionalität miteinbeziehen. Automatische Bremseingriffe waren der erste Schritt in diese Richtung, jedoch wird die Fahrzeugquerföhrung bisher nicht eingesetzt, um das gesamte Kollisionsvermeidungspotential von Fahrzeugen zu nutzen.

In der vorliegenden Arbeit werden vier verschiedene Verfahren zur Fahrzeugführung im Sinne der Kollisionsvermeidung in Notsituationen entwickelt. Die Komplexität der Verfahren reicht von einfachen Bahnplanern, über massenpunktbasierte Optimierungen bis hin zu modellprädiktiven Verfahren, welche fahrdynamische Effekte explizit berücksichtigen. Die Arbeit zeigt die unterschiedlichen Eigenschaften, Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen der Verfahren auf, bewertet und vergleicht diese miteinander.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation TU Dortmund

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-380812-0

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dortmund und resultiert aus einem kooperativen Forschungsprojekt mit dem Unternehmen TRW Automotive GmbH.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram für die Möglichkeit zur freien Gestaltung meiner wissenschaftlichen Arbeit und die ausgezeichnete Betreuung, welche diese Arbeit überhaupt erst ermöglichte.

Ebenfalls möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Mitberichts danken.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Stephan Frei als drittem Prüfer und Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Neyer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Regelungssystemtechnik bedanke ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Herrn apl. Professor Dr. rer. nat. Frank Hoffmann danke ich für zahlreiche Anregungen und Ratschläge. Dr.-Ing. Jörn Malzahn gilt mein Dank für hilfreiche Diskussionen über Regelungstechnische Fragestellungen. Artemi Makarow danke ich für seine umfassende und unermüdliche Unterstützung in jeder Hinsicht. Christoph Rösmann gilt mein Dank für die Bereitstellung des MPC Frameworks, Christian Götte und Andreas Homann für den regen Austausch im Bereich der Fahrzeugsystemtechnik. Meinen langjährigen Bürokollegen Dr.-Ing. Javier Antonio Oliva Alonso, Malte Oeljeklaus und Christian Wissing danke ich für den kollegialen Umgang. Für die stets freundliche Unterstützung im technischen und administrativen Bereich bedanke ich mich bei Gabriele Rebbe, Mareike Leber, Jürgen Limmhoff und Rainer Müller-Burtscheid.

Einige Ideen der vorliegenden Arbeit entstanden auch im Rahmen von studentischen Arbeiten. Den beteiligten Studierenden möchte ich ebenfalls danken.

Allen beteiligten Mitarbeitern der TRW Automotive GmbH danke ich für die gute Zusammenarbeit. Dr.-Ing. Alois Seewald gilt mein Dank für die Förderung des Kooperationsprojektes. Bei Dr.-Ing. Carsten Haß bedanke ich mich für die Initiierung des Kooperationsprojektes sowie für die sehr gute und persönliche Betreuung. Markus

Buß möchte ich für die technische Unterstützung und für viele unterhaltsame Stunden und Tage auf der Teststrecke danken.

Mein Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, welche ein Umfeld geschaffen haben, welches zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Ganz besonders danke ich meinen Eltern Heidrun Ingrid und Rainer Jürgen Keller für die Unterstützung auf meinem Lebensweg.

Meiner Lebensgefährtin Sandy Hentschel danke ich ganz herzlich für die jahrelange Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Grundaufgaben eines Kollisionsvermeidungssystems . . . . .	3
1.3. Stand der Forschung und Technik . . . . .	4
1.4. Inhalt und Ziel der Arbeit . . . . .	12
1.5. Gliederung . . . . .	13
<b>2. Entwicklungsumgebungen</b>	<b>14</b>
2.1. Durchgängige Entwicklungsmethode . . . . .	14
2.2. Fahrsimulator . . . . .	16
2.3. Anwendung des Fahrsimulators in der Probandenstudie . . . . .	18
2.4. Prototypisches Versuchsfahrzeug . . . . .	21
<b>3. Prädiktionsmodelle</b>	<b>25</b>
3.1. Massenpunktmodell . . . . .	25
3.2. Fahrdynamikmodelle . . . . .	26
3.3. Modellierung der Aktuatorregelkreise . . . . .	31
3.4. Auswahl des vollständigen Prädiktionsmodells . . . . .	32
<b>4. Bahnfolgeverfahren</b>	<b>35</b>
4.1. Beschreibung von Ausweichbahnen durch Funktionen . . . . .	36
4.2. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung . . . . .	37
4.3. Fahrzeugquerregelung . . . . .	39
4.4. Fahrzeuglängsregelung . . . . .	43
4.5. Ergebnisse . . . . .	44
4.6. Verifikation im Versuchsfahrzeug . . . . .	49
<b>5. Online-Trajektorienoptimierungsverfahren</b>	<b>51</b>
5.1. Beschreibung der Fahrzeugbewegung mit Timed Elastic Bands . . . . .	52
5.2. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung . . . . .	54
5.2.1. Anforderungen an das Gütemaß . . . . .	54
5.2.2. Aufbau des Gütemaßes . . . . .	55
5.2.3. Zielkonflikte zwischen Gütemaßanteilen . . . . .	57

5.2.4. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung . . . . .	58
5.3. Fahrdynamikregelung . . . . .	58
5.4. Ergebnisse . . . . .	61
<b>6. Modellprädiktives Planungs- und Regelungsverfahren</b>	<b>65</b>
6.1. Formulierung des Optimalsteuerungsproblems . . . . .	68
6.2. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung . . . . .	69
6.2.1. Aufbau des Gütemaßes . . . . .	69
6.2.2. Zielkonflikte zwischen Gütemaßanteilen . . . . .	70
6.2.3. Wahl der Gewichtungsfaktoren . . . . .	71
6.2.4. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung . . . . .	72
6.3. Ergebnisse . . . . .	72
<b>7. Modellprädiktives Trajektorienscharverfahren</b>	<b>76</b>
7.1. Trajektorienschar und suboptimale Lösung des Optimalsteuerungsproblems . . . . .	77
7.2. Adaptive Stellgrößendiskretisierung . . . . .	78
7.3. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung . . . . .	79
7.3.1. Aufbau des Gütemaßes . . . . .	79
7.3.2. Wahl der Gewichtungsfaktoren . . . . .	80
7.3.3. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung . . . . .	81
7.4. Ergebnisse . . . . .	82
<b>8. Analyse, Vergleich und Bewertung der Verfahren</b>	<b>87</b>
8.1. Auswahl von Vergleichsmethoden . . . . .	87
8.2. Vergleich in einer Beispielsituation . . . . .	88
8.3. Vergleich mit der Nutzwertanalyse . . . . .	90
8.4. Modifikationen und Kombinationen der Verfahren . . . . .	95
8.5. Fazit . . . . .	97
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>99</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>101</b>
A.1. Definitionen . . . . .	101
A.1.1. Begriffe des Straßenbaus . . . . .	101
A.1.2. Begriffe der Fahrzeugführung . . . . .	102
A.1.3. Zur Kritikalität von Verkehrssituationen . . . . .	103
A.1.4. Weitere Definitionen . . . . .	106
A.2. Modellprädiktive Trajektorienscharregelung . . . . .	107
<b>Literatur</b>	<b>113</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen und Akronyme

ABS	Anti-lock Braking System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACR	Active Control Retractor
AEB	Autonomous Emergency Braking
ASR	Antriebsschlupfregelung
AWP	Anfangswertproblem
CAN	Controller Area Network
ESA	Emergency Steering Assist
ESC	Electronic Stability Control
ESM	Einspurmodell
HMI	Human Machine Interface
KVT	Kollisionsvermeidungstrajektorie
LGA	Lane Guidance Assist
LKA	Lane Keeping Assist
LKW	Lastkraftwagen
LRW	Lenkradwinkel
LWR	Lenkwinkelregler
MPC	Model Predictive Control
MPPC	Model Predictive Planning and Control
MPTSA	Model Predictive Trajectory Set Approach
MPTSC	Model Predictive Trajectory Set Control
MSR	Motorschleppmomentenregelung
NRMSE	Normalised Root Mean Squared Error
OTO	Online-Trajectory Optimization
PFA	Path Following Approach
PKW	Personenkraftwagen
RCP	Rapid Control Prototyping
SP	Schwerpunkt
TEB	Timed Elastic Band
TTC	Time To Collision
bzw.	beziehungsweise
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

## Griechische Symbole

$\Delta_{\max}$	maximale Abweichung der Istbahn von der Sollbahn
$\Delta\Psi$	relativer Gierwinkel zur Fahrbahn
$\Delta T$	Zeitdifferenz
$\Delta t$	Schrittweite des Euler-Vorwärts-Integrationsverfahrens
$\Delta X$	Abstand des Schwerpunktes des Hindernisses zur Wendestelle der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$\Delta Y$	Entfernung des Fahrzeugschwerpunktes zur Spurmitte
$\Gamma$	Kostenterm
$\Gamma_l$	linker Teil des Umgebungsmodell
$\Gamma_r$	rechter Teil des Umgebungsmodell
$\Gamma_{pf,k}$	Umgebungsmodell des MPTSA
$\Phi$	relativer Gierwinkel zwischen Ego- und Hindernisfahrzeug
$\Psi$	Gierwinkel
$\Psi_{\lim}$	unterer Grenzwert der Gierrate
$\Psi_{\lim,krit}$	Grenzwert der Gierrate für die Bewertung der Kritikalität
$\Psi_{\lim,krit}$	Grenzwert des Gierwinkels für die Bewertung der Kritikalität
$\Psi_{\lim,stat}$	Grenzwert der Gierbeschleunigung für einen stationären Zustand
$\Psi_{\lim,stat}$	Grenzwert der Gierrate für die stationäre Kreisfahrt
$\dot{\Psi}_{\text{mess}}$	gemessene Gierrate
$\dot{\Psi}_{\text{sim}}$	simulierte Gierrate
$\dot{\Psi}_{\text{soll}}$	Sollgierrate
$\dot{\Psi}_{\text{soll,ff}}$	Vorsteueranteil des Positionsreglers
$\dot{\Psi}_{\text{stat}}$	Kreisfahrtwerte der Gierrate
$\alpha$	Schräglaufwinkel
$\alpha_h$	Schräglaufwinkel hinten
$\alpha_v$	Schräglaufwinkel vorne
$\alpha_{v,\max}$	maximaler Schräglaufwinkel (Untersteuergrenze)
$\alpha_{v,\min}$	minimaler Schräglaufwinkel (Untersteuergrenze)
$\beta$	Schwimmwinkel
$\beta_{\lim,krit}$	Grenzwert des Schwimmwinkels für die Bewertung der Kritikalität
$\beta_{\lim,stat}$	Grenzwert des Schwimmwinkels für die stationäre Kreisfahrt
$\dot{\beta}_{\lim,stat}$	Grenzwert der Schwimmwinkeländerung für einen stationären Zustand
$\beta_{\text{stat}}$	Kreisfahrtwerte des Schwimmwinkels
$\delta$	Lenkradwinkel
$\delta_{aD}$	adaptiv diskretisierter Lenkradwinkel
$\delta_{lD}$	linear (äquidistant) diskretisierter Lenkradwinkel
$\delta_{\max}$	maximaler Lenkradwinkel (Untersteuergrenze)
$\dot{\delta}_{\max}$	obere Grenze des Betrages der Lenkrate
$\delta_{\max,dis}$	maximaler Solllenkradwinkel für die diskrete Menge an möglichen Lenkradwinkeln
$\delta_{\min}$	minimaler Lenkradwinkel (Untersteuergrenze)
$\dot{\delta}_{\min}$	untere Grenze des Betrages der Lenkrate

$\delta_{\text{SH}}$	Lenkwinkelsollwert des Spurhaltereglers
$\delta_{\text{soll}}$	Solllenkradwinkel
$\delta_{\text{SW}}$	Lenkwinkelsollwert des Gierratenreglers für Spurwechsel
$\delta_v$	Radlenkwinkel
$\epsilon$	Abstandsparameter der Soft-Constraint Funktion
$\gamma$	Gewichtung
$\gamma_a$	Gewichtung der Beschleunigung
$\gamma_{a,SC}$	Gewichtung der Soft-Constraints der Beschleunigung
$\gamma_{\text{env}}$	Gewichtung des Umgebungsmodells
$\gamma_j$	Gewichtung des Rucks
$\gamma_{j,SC}$	Gewichtung der Soft-Constraints des Rucks
$\gamma_\lambda$	Gewichtung des Kurswinkels
$\gamma_\Psi$	Gewichtung des Gierwinkels
$\gamma_s$	Gewichtung des Sollschlupfes
$\gamma_{\text{sys}}$	Gewichtung der Gleichheitsnebenbedingung des MPPC (Einhaltung der Systemdynamik)
$\gamma_u$	Gewichtung der Ungleichheitsnebenbedingung des MPPC (Stellgrößenbeschränkung)
$\gamma_X$	Gewichtung der Längsabweichung von der Solltrajektorie
$\gamma_Y$	Gewichtung der Querabweichung von der Solltrajektorie
$\lambda$	Kurswinkel
$\omega$	Raddrehzahl
$\tau$	Menge der Zeitdifferenzen
$\Gamma_{\text{env}}$	Umgebungsmodell

## Lateinische Symbole

$A$	Menge der diskreten Solllenkradwinkel
$B$	Menge der diskreten Sollschlupfwerte
$B_{LWR}$	Funktion zur Begrenzung der Lenkrate
$B_y, B_x$	Parameter der Reifenkennlinien
$C_y, C_x, C_a, C_s$	Parameter der Reifenkennlinien
$D$	Differentialregleranteil
$D_y, D_x, D_a, D_s$	Parameter der Reifenkennlinien
$E_g$	exponentieller Gewichtungsfaktor
$E_y, E_x$	Parameter der Reifenkennlinien
$F_{max}$	Maximalkraft
$F_{tot}$	Gesamtkraft
$F_x$	Längskraft (allgemein)
$F_{x0}$	Längskraft ohne Querschlupf
$F_{xh}$	Längskraft Hinterrad
$F_{xv}$	Längskraft Vorderrad
$F_{xvr}$	Längskraft Vorderrad in Radkoordinaten
$F_y$	Querkraft (allgemein)
$F_{y0}$	Querkraft ohne Längsschlupf
$F_{yh}$	Querkraft Hinterrad
$F_{vv}$	Querkraft Vorderrad

$F_{yvr}$	Querkraft Vorderrad in Radkoordinaten
$G_{LS}$	Übertragungsfunktion des Lenksystems
$G_x$	Gewichtungsfaktor der Längskraft (allgemein)
$G_{xh}$	Gewichtungsfaktor der Längskraft Hinterachse
$G_{xvr}$	Gewichtungsfaktor der Längskraft Vorderachse
$G_y$	Gewichtungsfaktor der Querkraft (allgemein)
$G_{yh}$	Gewichtungsfaktor der Querkraft Hinterachse
$G_{yvr}$	Gewichtungsfaktor der Querkraft Vorderachse
$I$	Integralregleranteil
$J_{a,y}$	Gütemaß zur Bewertung der Abweichung zwischen der gemessenen und der simulierten Querbeschleunigung
$J_{ESM}$	Gütemaß zur Identifikation des Einspurmodells
$J_{LA}$	Trägheit des Lenkaktuators
$J_{LS}$	Gütemaß des Riccati-Reglers des Lenksystems
$J_{Lag}$	Langrangesches Gütemaß
$J_{Lag,MPTSC}$	Langrangesches Gütemaß des MPTSC
$J_{Lag,Ric}$	Langrangesches Gütemaß des Riccati-Reglers
$J_{MPPC}$	Gütemaß des MPPC
$J_{MPTSA}$	Gütemaß des MPTSA
$J_{MPTSC}$	Gütemaß des MPTSC
$J_{MR}$	Gütemaß zur Optimierung des MPTSC
$J_{\dot{\Psi}}$	Gütemaß zur Bewertung der Abweichung zwischen der gemessenen und der simulierten Gierrate
$J_{Ric}$	Gütemaß zur Optmierung der Gewichtungsmatrizen des Riccati-Reglers
$J_{TEB}$	Gütemaß des TEB
$J_z$	Gierträgheitsmoment des Fahrzeugs
$K_{ges}$	Gesamtkritikalität einer Verkehrssituation
$KIB$	Kritikalitätsindikator bezüglich des Nutzungsgrades der Bewegungspotentiale
$KIU$	Kritikalitätsindikator bezüglich der Unsicherheit über die Bewegung der Verkehrsteilnehmer
$K_{pot}$	Kritikalität bezüglich des Nutzungsgrades der Bewegungspotentiale
$K_{uns}$	Kritikalität bezüglich der Unsicherheit über die Bewegung der Verkehrsteilnehmer
$M_{BS}$	Führungsfilter des Beispielsystems
$P$	Proportionalregleranteil
$P_k$	Punkte des TEB
$Q_{dyn}$	dynamische Größe
$Q_{dyn,max}$	Maximalwert einer dynamischen Größe
$Q_{TEB}$	Menge der Punkte des Timed Elastic Band
$ST$	Strafterm zur Bestrafung von Kollisionen
$T_a$	Unterstützendes Lenkmoment
$T_{BS}$	Zeitkonstante des Beispielsystems
$T_d$	Lenkmoment (Drehmomentsregler)

$TEB$	Timed Elastic Band
$T_F$	Lenkmoment des Fahrers
$T_{\text{Kol}}$	Horizont zur Überwachung von Kollisionen
$T_{\text{LWR}}$	Zeitkonstante des Lenkradwinkelregelkreises
$T_m$	Lenkmoment (Microcontroller)
$T_O$	Lenkmomentenüberlagerung (Torque Overlay)
$T_{\text{pr}}$	Prädiktionszeit
$T_r$	Lenkmoment (RCP System)
$T_{\text{rück}}$	Rückstellmoment der Vorderreifen
$T_s$	Zeitkonstante des Schlupfregelkreises
$T_{\text{sen}}$	am Torsionsstab gemessenes Drehmoment
$T_{\Sigma}$	Summenzeitkonstante
$T_{\text{TC}}$	Zeitkonstante des Drehmomentregelkreises
$UWE$	Überschwingweite
$X$	erdfeste Koordinate
$X_{\Delta,\text{max}}$	Stelle in erdfesten Koordinaten, an der die maximale Abweichung der Istbahn von der Sollbahn auftritt
$X_e$	Endposition des Spurwechselpolynoms
$X_{\text{Obs}}$	Schwerpunktkoordinate des Hindernisses
$X_{\text{Oe}}$	Position der hinteren Kante des Hindernisses
$Y$	erdfeste Koordinate
$Y_0$	Startwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$Y_e$	Endposition des Spurwechselpolynoms
$Y_{\text{end}}$	Endwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$Y_{\text{max}}$	oberer Grenzwert des Umgebungsmodells
$Y_{\text{min}}$	unterer Grenzwert des Umgebungsmodells
$Y_{\text{Obs}}$	Schwerpunktkoordinate des Hindernisses
$Y_{\text{Oe}}$	Position der hinteren Kante des Hindernisses
$Y_{\text{pol}}$	Spurwechselpolynom
$Y_{\text{safe}}$	Position mit Sicherheitsabstand zum Hindernis
$Y_{\text{soll}}$	Sollbahn
$a$	Beschleunigung
$a_{0\dots 5}$	Polynomkoeffizienten
$aD_{0\dots 4}$	Koeffizienten des Polynoms für die adaptive Diskretisierung
$a_{\text{max}}$	maximale Gesamtbeschleunigung
$a_n$	Normalbeschleunigung
$a_t$	Tangentialbeschleunigung
$a_{\text{tot}}$	Gesamtbeschleunigung
$a_x$	Längsbeschleunigung
$a_{x,\text{soll}}$	Solllängsbeschleunigung
$a_y$	Querbeschleunigung
$a_{y,\text{lim}}$	unterer Grenzwert der Querbeschleunigung
$a_{y,\text{mess}}$	gemessene Querbeschleunigung
$a_{y,\text{sim}}$	simulierte Querbeschleunigung
$b_{\text{LA}}$	Viskose Reibung des Lenkaktuators
$b_{\text{Obs}}$	Breite des Hindernisses

$c_i$	Polynomkoeffizienten
$d_1, d_2$	Abstandsparameter des Umgebungsmodells des MPTSA
$d_{BS}$	Dämpfungskonstante des Beispielsystems
$d_{Lag}$	relative Änderung des Lagrangeschen Gütemaßes
$d_{Limit}$	Grenzwert des Umgebungsmodells des MPTSA
$d_{LWR}$	Dämpfungskonstante des Lenkradwinkelregelkreises
$d_{min,X}$	Abstand des Hindernisses zur Wendestelle der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$d_{min,Y}$	Abstand des Hindernisses zum oberen Grenzwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$d_{Obs}$	kleinster Abstand der vier Ecken des Ego-Fahrzeugs zum Schwerpunkt des Hindernisses
$fit$	Fit-Wert
$f_{0bs}$	Funktion des Umfeldmodells
$f_p$	Formungspараметр des Umgebungsmodells des MPTSA
$f_{SC}$	Soft-Constraint Funktion
$g$	Erdbeschleunigung
$g_u$	Gewichtungsfunktion einer Stellgröße
$g_y$	Gewichtungsfunktion einer Ausgangsgröße
$h$	Gleichheitsnebenbedingung des MPPC
$i, j, k$	Laufindex
$i_s$	Lenkübersetzung
$j_n$	Normalruck
$j_t$	Tangentialruck
$k_{LS}$	Verstärkungsfaktor des Lenksystems
$k_{LWR}$	Verstärkungsfaktor des Lenkradwinkelregelkreises
$k_s$	Verstärkungsfaktor des Schlupfregelkreises
$l_h$	Abstand der Hinterachse vom Fahrzeugschwerpunkt
$l_{Obs}$	Länge des Hindernisses
$l_v$	Abstand der Vorderachse vom Fahrzeugschwerpunkt
$m$	Fahrzeugmasse
$n_c$	Kontrollhorizont
$n_\gamma$	Anzahl der Kostenterme des TEB
$n_p$	Prädiktionshorizont
$r_{Bx1}, r_{Bx2}, r_{By1}, r_{By2}$	Parameter der Reifenkennlinien
$r_{dyn}$	Dynamischer Radhalbmesser
$s$	Laplace Variable
$s_{hl}$	Schlupf des hinteren linken Rades
$s_{hr}$	Schlupf des hinteren rechten Rades
$s_l$	Schlupf
$s_{l,min}$	unterer Sollschlupfgrenzwert
$s_{soll}$	Sollschlupf
$s_{vl}$	Schlupf des vorderen linken Rades
$s_{vr}$	Schlupf des vorderen rechten Rades
$t$	Zeit
$t_{la}$	Vorausschauzeit

$u_{BS,max}$	obere Stellgrößenbeschränkung des Beispielsystems
$u_{BS,min}$	untere Stellgrößenbeschränkung des Beispielsystems
$v$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{init}$	initiale Geschwindigkeit, mit der ein Notmanöver begonnen wird
$v_{x,rad}$	Längsgeschwindigkeit in Radkoordinaten
$v_{y,rad}$	Quergeschwindigkeit in Radkoordinaten
$y_{BS}$	Ausganggröße des Beispielsystems
$y_{MPTSC}$	Ausgangsgröße des mit einem MPTSC geregelten Systems
$y_{Ref}$	Referenzgröße
$y_{Ric}$	Ausgangsgröße des mit einem Riccati-Regler geregelten Systems
$z$	Variable der Soft-Constraint Funktion
$z_m$	Grenzwert (Constraint) der Soft-Constraint Funktion
$A_{BS}$	Systemmatrix des Beispielsystems
$P$	Gewichtungsmatrix der Gleichheitsnebenbedingung beim MPPC
$Q$	Gewichtungsmatrix der Zustandsgrößen beim MPPC
$Q_{LS}$	Gewichtungsmatrix für die Lenksystemregelung
$Q_n$	Gewichtungsmatrix des Endwertes beim MPPC
$Q_{Ric}$	Gewichtungsmatrix des Riccati-Reglers
$R$	Gewichtungsmatrix der Stellgrößen beim MPPC
$R_{Ric}$	Gewichtungsmatrix des Riccati-Reglers
$S$	Gewichtungsmatrix der Änderung der Stellgrößen beim MPPC
$S_{LS}$	Gewichtungsmatrix für die Lenksystemregelung
$b_{BS}$	Eingangsvektor des Beispielsystems
$c_{BS}$	Ausgangsvektor des Beispielsystems
$e_n$	normaler Einheitsvektor
$e_t$	tangentialer Einheitsvektor
$f$	(nichtlineare) mehrdimensionale Funktion
$g$	Ungleichheitsnebenbedingung
$k_{BS}$	Verstärkungsvektor des Zustandsreglers des Beispielsystems
$u$	Stellvektor
$x$	Zustandsvektor
$x_{BS}$	Zustandsvektor des Beispielsystems
$x_\lambda$	reduzierter Zustandsvektor zur Kurswinkelregelung
$x_v$	reduzierter Zustandsvektor zur Geschwindigkeitsregelung

## Kurzfassung

In kritischen Situationen sind viele Fahrer von PKWs mit der Fahrzeugführungs-aufgabe überfordert. Die Unfallzahlen konnten bis 2013 auch durch die Einführung von aktiven Fahrerassistenzsystemen wie ABS, ASR und ESC gesenkt werden. In den folgenden Jahren ist ein leichter Anstieg zu verzeichnen. Um die Unfallzahlen wieder zu senken, werden neue Fahrerassistenzsysteme benötigt, die neben fahrdynamischen Größen auch Informationen über das Fahrzeugumfeld miteinbeziehen. Dies kann durch assistierende Funktionen, welche der Fahrer im Fehlerfall übersteuern kann, und/oder durch automatisierte Fahrfunktionen realisiert werden. Die Arbeit beschreibt und vergleicht vier verschiedene Verfahren zur Fahrzeugführung, die zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr eingesetzt werden können. Das Bahnfolgeverfahren verwendet eine analytische Funktion zur Beschreibung der Ausweichbahn und eine Folgeregelung zur Führung des Fahrzeugs entlang der Bahn. Es ist ein einfaches Konzept, welches mit wenig Rechenleistung auskommt, sich aber nicht an viele verschiedene Situationen anpassen lässt. Deshalb wird das Online-Trajektorienoptimierungsverfahren entwickelt. Zur Berechnung der Ausweichtrajektorien wird ein Gütemaß minimiert, welches Anteile zur Kollisionsvermeidung und zur Minimierung fahrdynamischer Reaktionen enthält. Die Realisierung der fortlaufend neu geplanten Trajektorie wird mit einer unterlagerten Geschwindigkeits- und Kurswinkelregelung durchgeführt. Das modellprädiktive Planungs- und Regelungsverfahren löst analog zum Online-Trajektorienoptimierungsverfahrens in jedem Abtastschritt ein Optimierungsproblem. Die kollisionsfreie Trajektorie wird zusätzlich an die Dynamikgleichungen eines Einspurmodells angepasst. Das Optimierungsproblem ist daher ein Optimalsteuerungsproblem, dessen Lösung neben der optimalen Trajektorie auch die zugehörigen Stellgrößen enthält. Die bisher getrennt behandelten Probleme, Trajektorienplanung und Folgeregelung, werden also in einem Schritt gelöst. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der nochmals höhere Rechenaufwand im Vergleich zum Online-Trajektorienoptimierungsverfahren. Durch die Beschränkung auf konstante Stellgrößen während der Prädiktion und eine grobe Stellgrößendiskretisierung weist das modellprädiktive Trajektorienscharverfahren eine deutlich niedrigere Rechenlast auf. Die Vorteile der modellprädiktiven simultanen Planung und Regelung bleiben erhalten, jedoch können auf Grund des kurzen Prädiktionshorizontes weiter entfernte Hindernisse nicht in der Planung berücksichtigt werden. Durch die adaptive Wahl der Diskretisierung wird auch im stationären Zustand eine hohe Regelungsgüte erreicht. Der abschließende Vergleich durch eine Nutzwertanalyse zeigt, dass die vier Verfahren, in Abhängigkeit des Anwendungsfalles, unterschiedlich gut geeignet sind.