

AUTOREN



Dipl.-Ing. Tim Hansen
ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Fachgebiet
Regelungstechnik und
Mechatronik der
TU Darmstadt.



Michael Schulz, M. Sc.
arbeitet in der
Vorentwicklung für
Fahrerassistenzsysteme im
Geschäftsbereich Chassis
System Control der Robert
Bosch GmbH in Abstatt.



Dr.-Ing. Michael Knoop
arbeitet in der Entwicklung
für das hochautomatisierte
Fahren im Geschäftsbereich
Chassis System
Control der Robert Bosch
GmbH in Abstatt.



**Prof. Dr.-Ing.
Ulrich Konigorski**
ist Leiter des Fachgebiets
Regelungstechnik und
Mechatronik der
TU Darmstadt.

Trajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel

Assistenzsysteme nehmen in modernen Fahrzeugen eine immer wichtigere Rolle ein. Neben der Entlastung des Fahrers sorgen sie für zunehmende Sicherheit im Verkehr. An der TU Darmstadt wurde in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH ein System zum automatisierten Fahrstreifenwechsel mit kombinierter Längs- und Querverführung auf der Autobahn entwickelt.



1	MOTIVATION
2	AUFBAU DES SYSTEMS
3	ANSATZ
4	DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER TRAJEKTORIENGENERIERUNG UND BEWERTUNG
5	ERGEBNISSE
6	ZUSAMMENFASSUNG

1 MOTIVATION

Beim Vergleich von Systemen zum automatisierten Fahrstreifenwechsel ist im Wesentlichen die Menge der abgedeckten Szenarien entscheidend. So wurden bereits 1994 erste einfache automatisierte Fahrstreifenwechsel im Projekt VITA II durchgeführt [1]. Bei diesen frühen Projekten basierten die Fahrstreifenwechsel jedoch primär auf vorher festgelegten Trajektorien. Diese wurden nur geringfügig angepasst, zum Beispiel an die Fahrstreifenbreite. Sofern ein ausreichend großer Bereich neben dem aktuellen Fahrzeug frei war, konnte der Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden.

In neueren Arbeiten wird die Trajektorie stärker an die Umfeldsituation angepasst. So wird insbesondere auch die Längsbewegung variiert. Durch die kombinierte Längs- und Querplanung können Quer- und Längstrajektorie besser aufeinander abgestimmt werden. Denn je nachdem, welche Längstrajektorie gewählt wird, steht für die Querbewegung unterschiedlich viel Zeit zur Verfügung. Aufgrund dieses Sachverhalts ist es auch vorteilhaft, anstatt einer Bahnplanung $y(x)$ eine Trajektorienplanung $(x(t), y(t))$ durchzuführen. Die Trajektorie ergibt sich hierbei häufig aus der Lösung eines Optimierungsproblems, dessen Lösung sich nicht direkt analytisch berechnen lässt, sondern mithilfe eines Solvers iterativ

bestimmt werden muss. Durch die zyklische Neuberechnung der Trajektorie entspricht dies einer modellprädiktiven Regelung.

Für die Darstellung der Trajektorie und somit deren Parameter gibt es unterschiedliche Ansätze. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Polynoms fünften oder siebten Grads für Längs- und Querrichtung. Das Polynom ist hierbei durch seine Randbedingungen definiert. Um unterschiedliche Trajektorien zu generieren, werden für Endposition und Endzeit verschiedene diskrete Werte verwendet. Alle möglichen Kombinationen werden hierbei ausgewertet und die Kombination mit der besten Bewertung ausgewählt. Dieser Ansatz wird in den Arbeiten [2, 3] verfolgt. Für die Planung eines Fahrstreifenwechsels wird hier vorausgesetzt, dass die Querbewegung zum Startzeitpunkt begonnen werden kann.

Ist die Rechenzeit von untergeordneter Bedeutung und steht die Flexibilität im Vordergrund, so wird bevorzugt eine Trajektorien-darstellung basierend auf einer festen Menge zeitlich definierter Abtastzeitpunkte verwendet. Die Stützpunkte zu diesen Abtastzeitpunkten werden dann mithilfe numerischer Solver so bestimmt, dass eine Gütefunktion ihr Minimum erreicht [4, 5]. Dieser Ansatz ist sehr flexibel, benötigt jedoch auch verhältnismäßig viel Rechenzeit.

Ziel des Projekts der TU Darmstadt und der Robert Bosch GmbH ist die Entwicklung eines Systems zum automatisierten Fahrstreifenwechsel auf der Autobahn. Hierfür soll das Fahrzeug sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung geführt werden. Durch diese Eigenschaft lässt sich das System zukünftig auch zum Einfädeln auf die Autobahn verwenden. Das Assistenzsystem soll nur während des Fahrstreifenwechsels die Fahrzeugführung übernehmen. Nach Abschluss des Vorgangs soll das Fahrzeug wieder an die automatisierte Längs- und Querführung übergeben werden. Um den Algorithmus auf herkömmlichen Steuergeräten umsetzen zu können, wurde großer Wert auf eine möglichst geringe Rechenzeit gelegt. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug mit vier Mid-Range-Radar(MRR)-Sensoren und einem Long-Range-Radar(LRR)-Sensor zum Erkennen der Umfeldobjekte sowie einer Kamera zur Detektion der Fahrstreifenmarkierungen ausgestattet ist, **BILD 1**.

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren ermöglicht es eine Trajektorie zu planen, bei der die Querbewegung erst an einem Zeitpunkt in der Zukunft begonnen wird. Gleichzeitig sind die Freiheitsgrade der Trajektorie hinreichend eingeschränkt, um die Berechnungen auf einem Steuergerät durchführen zu können. Der Zielzustand am Ende des Fahrstreifenwechsels wird hierbei nicht aus einer vorab bestimmten diskreten Menge ausgewählt, sondern durch einen Solver bestimmt. Da es sich um eine Komfortfunktion handelt, ist nur eine geringe Dynamik erforderlich. Daher wird als Fahrzeugmodell ein Massepunktmodell verwendet, um die Komplexität zu reduzieren.

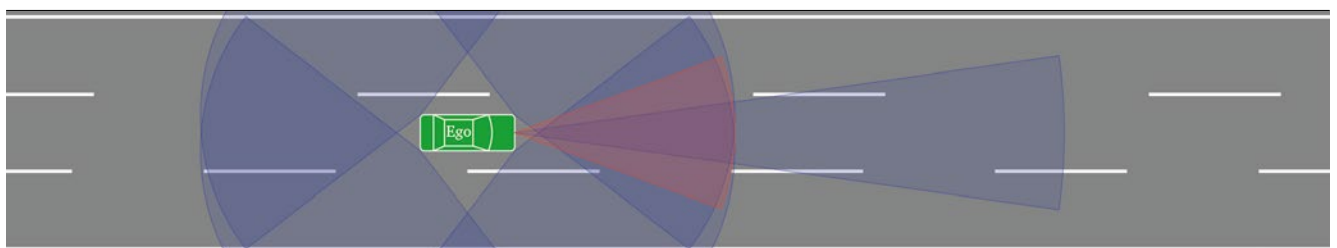


BILD 1 Fahrzeugsensoren: Radar blau, Video rot (Reichweiten nicht maßstäblich) © TU Darmstadt

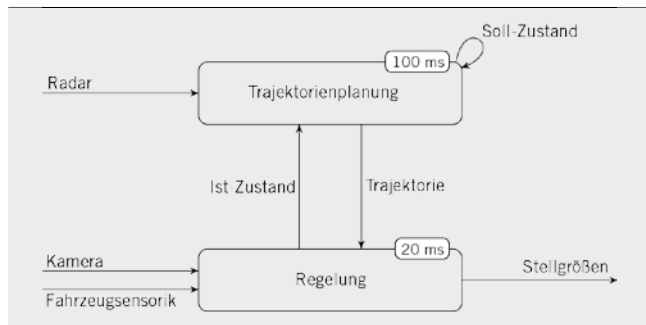


BILD 2 Systemaufbau (© TU Darmstadt)

2 AUFBAU DES SYSTEMS

Die Sensordaten werden zunächst vorverarbeitet. Mithilfe der Kameradaten sowie der Information über Geschwindigkeit und Schwimmwinkel wird ein Straßenkoordinatensystem erzeugt, dessen x-Richtung entlang der Fahrstreifenmarkierungen und deren y-Richtung senkrecht dazu ausgerichtet ist. Die Planung findet dann in diesem Straßenkoordinatensystem statt. Die Daten der einzelnen Radarsensoren werden fusioniert, sodass die Positionen und Ausdehnungen der anderen Fahrzeuge bekannt sind. Anschließend werden sie in das Straßenkoordinatensystem transformiert. Umfeldfahrzeuge belegen die von ihnen befahrenen Fahrstreifen über ihre komplette Breite. Bei einem Wechsel des Fahrstreifens kann ein Umfeldobjekt daher auch zwei Fahrstreifen belegen. Durch diese Annahmen lässt sich das Umfeld stark abstrahieren.

Das System kann in zwei Teile unterteilt werden, BILD 2. Der unterlagerte Teil dient zur Fahrzeugregelung und wird alle 20 ms auf einer Echtzeithardware berechnet. Im Planungsteil werden zyklisch alle 100 ms neue Trajektorien geplant. Beim Start des Fahrstreifenwechsels wird der Ist-Zustand des Fahrzeugs als Start-Zustand für die Planung übernommen. Während des Fahrstreifenwechsels wird als Start-Zustand hingegen der Soll-Zustand aus der vorherigen Trajektorie verwendet. Auf diese Weise ist die an die Regelung ausgegebene Trajektorie stetig und Hundekurven (sich zuziehende Kurven) [2] werden vermieden. In Situationen, in denen die unterlagerte Regelung dem Trajektorienverlauf nicht mehr folgen kann, muss der Start-Zustand entsprechend angepasst werden.

Das System unterstützt die Planung für bis zu drei unterschiedliche Lücken zwischen den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen, BILD 3. Für jede dieser Lücken wird eine Trajektorie geplant und später die beste ausgewählt. Für die Planung einer dieser Trajektorien wird das Umfeld so reduziert, dass nur noch vier Fahrzeuge betrachtet werden, BILD 4. Hierfür werden auf dem Startfahrstreifen

fen jeweils das Fahrzeug vor und hinter dem Ego-Fahrzeug betrachtet. Für den Zielfahrstreifen ergeben sich die Fahrzeuge aus der Lücke, in die das Ego-Fahrzeug wechseln soll. Die Fahrzeuge werden wie folgt bezeichnet:

- FS: Vorausfahrend Startfahrstreifen (Front Start Lane)
- TS: Hinterherfahrend Startfahrstreifen (Tail Start Lane)
- FD: Vorausfahrend Zielfahrstreifen (Front Destination Lane)
- TD: Hinterherfahrend Zielfahrstreifen (Tail Destination Lane).

3 ANSATZ

Aufgrund der Darstellung als Optimierungsproblem ist es zur Reduzierung der Rechenzeit vorteilhaft, die Anzahl an Optimierungsvariablen möglichst gering zu halten. Hierzu wird eine spezielle Parametrierungsmöglichkeit der Trajektorien erstellt. Es wird angenommen, dass sich vor und hinter den Umfeldobjekten Sicherheitsbereiche befinden, die nicht befahren werden dürfen, BILD 4. Die Größe dieser Sicherheitsbereiche ist geschwindigkeitsabhängig und berücksichtigt die Ausdehnung des eigenen Fahrzeugs. Die Querbewegung auf den Zielfahrstreifen darf nur in dem Bereich stattfinden, in dem sowohl Start- als auch Zielfahrstreifen befahren werden dürfen. Dieser Bereich wird im Folgenden als Lücke bezeichnet. Diese Lücke lässt sich im $x(t)$ -Diagramm in einem Beispielszenario gut darstellen. Hierbei werden die x-Positionen zur Verbesserung der Darstellbarkeit relativ zu einem bewegten Beobachter mit konstanter Geschwindigkeit aufgetragen, BILD 5. Dadurch lässt sich der Fahrstreifenwechsel in drei Segmente einteilen, BILD 6:

1. Fahrt zur Lücke auf dem Startfahrstreifen
2. Querbewegung in der Lücke
3. Zentrierung und Weiterfahrt auf dem Zielfahrstreifen.

Je nach Situation können einige der Segmente beim Fahrstreifenwechsel entfallen. Als Optimierungsvariablen werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten v_1, v_2 in den Segmenten 1 und 2 sowie die Geschwindigkeit v_e am Ende von Segment 2 verwendet, BILD 6. Aus diesen drei Variablen lassen sich die Zeitpunkte t_1, t_2 und Längspositionen $p_{x,1}, p_{x,2}$ an den Segmentübergängen bestimmen. Für die Längstrajektorie wird nun eine Trajektorie bestehend aus zwei Polynomen fünften Grads durch den Startpunkt P_0 sowie die Punkte $P_1(t_1|p_{x,1})$ und $P_2(t_2|p_{x,2})$, die die Lückengrenzen wiedergeben, gelegt. Aus Komfortgründen wird ein stetiger Verlauf der Beschleunigung an den Segmentübergängen gefordert. Am Endpunkt wird die Beschleunigung aus einer ACC-Funktion, die für die Endsituation berechnet wird, übernommen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Übergabe an den Abstandsregeltempomaten (ACC) am Ende des Fahrstreifenwechsels nicht spürbar ist. Die verbleibenden Freiheitsgrade werden so gewählt, dass sich ein ruckoptimaler Verlauf ergibt.

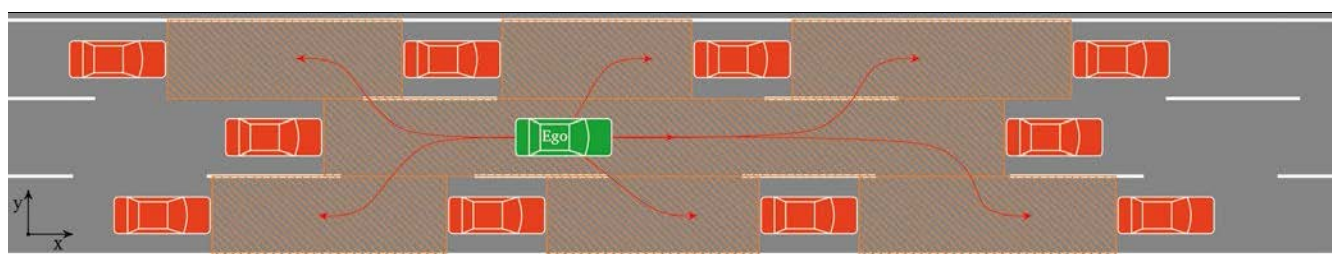
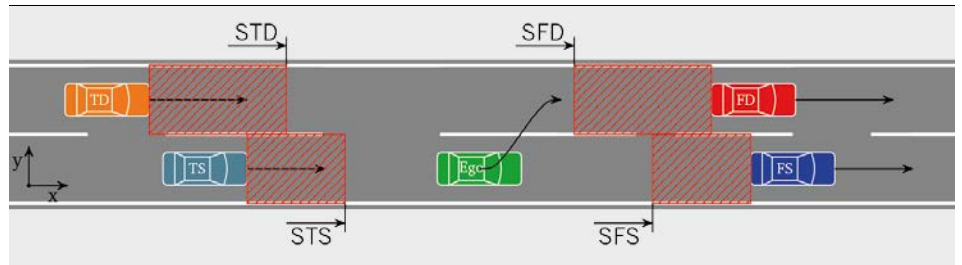


BILD 3 Mehrere Lücken pro Fahrstreifen (© TU Darmstadt)

BILD 4 Namen der reduzierten Umfeldfahrzeuge für die Planung in eine Lücke sowie deren Sicherheitsbereiche (© TU Darmstadt)



Für die Quertrajektorie werden die Zeitpunkte t_1 und t_2 übernommen. Die Quertrajektorie besteht in den Segmenten 1 und 2 ebenfalls aus je einem Polynom fünften Grads. Für die Beschreibung des Verlaufs im dritten Segment hat sich ein Zustandsregler als günstig erwiesen. Die Trajektorie wird so generiert, dass der Fahrstreifenwechsel primär in Segment 2 stattfindet. Die Details zur Trajektoriengenerierung werden in Abschnitt 4 erläutert. Somit ist die Quertrajektorie indirekt durch v_1 und v_2 parametrisiert.

Durch die Parameter v_1 , v_2 und v_e zusammen mit dem Umfeld ist somit die Trajektorie sowohl in Längs- als auch in Querrichtung festgelegt. Diese Trajektorie wird nun abgetastet und in Hinblick auf Komfort, Einfluss auf den rückwärtigen Verkehr, Eintritt in die

Sicherheitsbereiche, Beschränkungen der Fahrzeugdynamik sowie dem Endzustand bewertet. Die optimale Trajektorie wird durch einen nichtlinearen Optimierungsalgorithmus bestimmt. In diesem Fall wird der Downhill-Simplex-Algorithmus [6] verwendet.

4 DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER TRAJEKTORIENGENERIERUNG UND BEWERTUNG

Wie schon erläutert, wird die Trajektorie über die Durchschnittsgeschwindigkeiten in den Segmenten 1 und 2 sowie die Endgeschwindigkeit parametrisiert. Vom Startpunkt P0 der Planung lässt

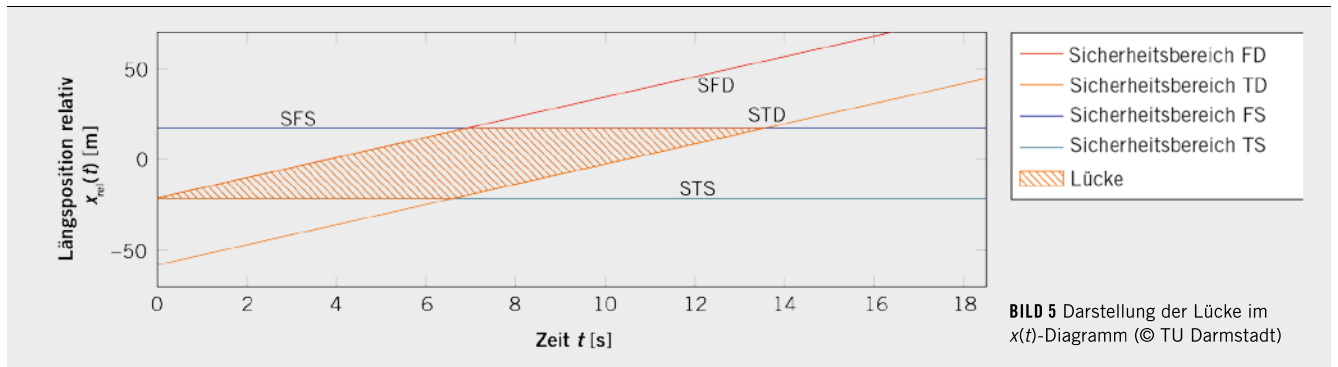


BILD 5 Darstellung der Lücke im $x(t)$ -Diagramm (© TU Darmstadt)

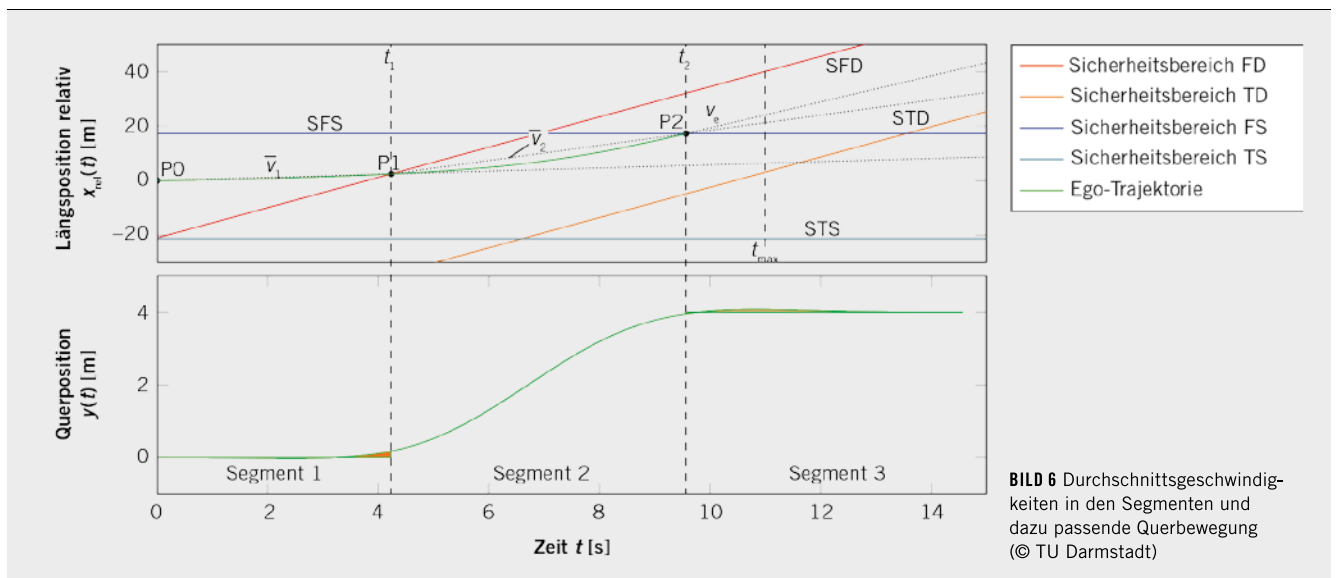


BILD 6 Durchschnittsgeschwindigkeiten in den Segmenten und dazu passende Querbewegung (© TU Darmstadt)

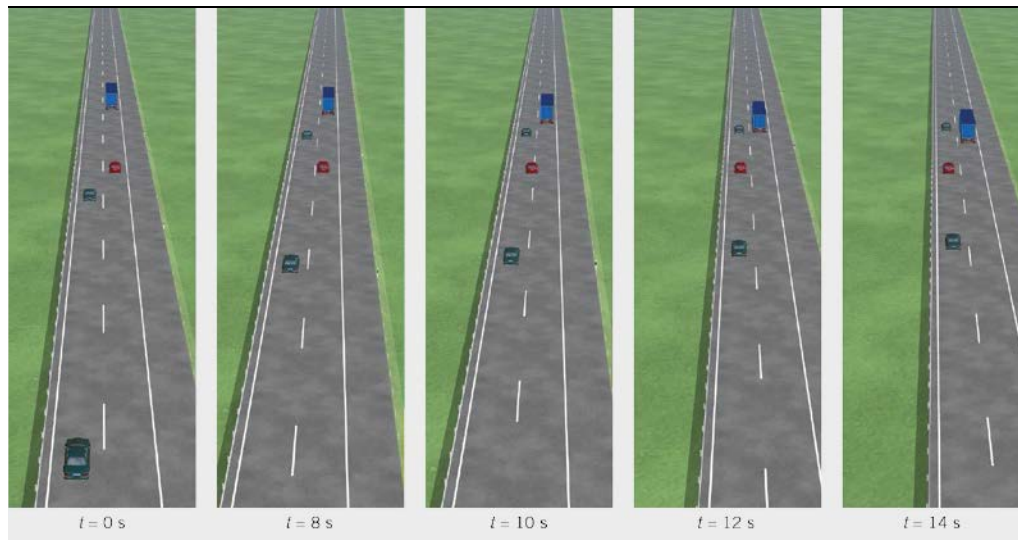


BILD 7 Simulation eines Fahrstreifenwechsels (realistische Proportionen) (© TU Darmstadt)

sich daher eine Gerade im $x(t)$ -Diagramm mit der Steigung v_1 einzeichnen, **BILD 6**. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Lücke definiert den Punkt $P1(t_1|p_{x,1})$. Von dort lässt sich wieder eine Gerade mit der Steigung v_2 einzeichnen. Deren Schnittpunkt mit der Lückengrenze beziehungsweise einer senkrechten Gerade zur Begrenzung der Dauer ergibt den Punkt $P2(t_2|p_{x,2})$. Die Maximaldauer t_{max} ergibt sich dabei situationsabhängig aus einem Optimierungsproblem mit linearer Zeitgewichtung. Die Endgeschwindigkeit an diesem Punkt ist eine Optimierungsvariable. Somit kann für die Endsituation die Beschleunigung berechnet werden, die ein fiktives einfaches ACC-System auf Basis des Intelligent Driver Models [7] ausgeben würde. Diese Vereinfachung ist notwendig, da die Beschleunigung für jeden Trajektorienkandidaten neu berechnet werden muss. Zusammen mit dieser Beschleunigung sind die Randbedingungen an die Trajektorie festgelegt. Die Polynomkoeffizienten werden nun so gewählt, dass die Randbedingungen erfüllt werden und das Integral über den quadrierten Ruck minimiert wird. Dies lässt sich durch Lösen eines linearen Gleichungssystems erreichen. Hierfür existieren effiziente Algorithmen, sodass nur wenig Rechenzeit benötigt wird. Die Quertrajektorie ergibt sich ebenfalls aus der Lösung eines quadratischen Optimierungsproblems. Minimiert wird hierzu das Gütefunktional:

Gl. 1	$J_{Lat} = \int_{t_0}^{t_1} [w_{11}(p_y - p_{y,Start})^2 + w_{12}v_y^2 + w_{13}a_y^2 + j_y^2] dt + \int_{t_1}^{t_2} j_y^2 dt + \int_{t_2}^{\infty} [w_{31}(p_y - p_{y,Ziel})^2 + w_{32}v_y^2 + w_{33}a_y^2 + j_y^2] dt$
--------------	---

Gewichtet wird in den Segmenten 1 und 3 die Abweichung der Querposition p_y von der jeweiligen Fahrstreifenmitte $p_{y,Start}$ beziehungsweise $p_{y,Ziel}$, die Quergeschwindigkeit v_y , die Querbeschleunigung a_y sowie der Ruck j_y . Im zweiten Segment wird lediglich der Ruck berücksichtigt. In den Segmenten 1 und 2 wird als Trajektorie jeweils ein Polynom fünften Grads angesetzt. Im dritten Segment wird die Trajektorie über einen Zustandsregler bestimmt. Dieser Zustandsregler ist als Optimalregler, der das Integral von t_2 bis unendlich minimiert, ausgelegt. Der sich ergebende Verlauf wird durch eine Matrix-Exponentialfunktion beschrieben und stellt das Optimum für das dritte Segment dar.

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Polynomkoeffizienten berechnet werden müssen und trägt so zur Reduktion des Rechenaufwands bei. Des Weiteren kann der Anteil des dritten Segments am Gütefunktional analytisch aus dem Endzustand des zweiten Segments bestimmt werden. Damit ergibt er sich direkt aus den Polynomkoeffizienten des zweiten Segments.

Nach Einsetzen der Anfangs- und Übergangsbedingungen verbleiben für die Trajektorie sechs Freiheitsgrade. Die dazugehörigen Polynomkoeffizienten, die J_{Lat} minimieren, können durch Lösen eines linearen Gleichungssystems bestimmt werden. Die so erhaltene Trajektorie wird abgetastet, und basierend darauf werden weitere Bewertungen vorgenommen. Die zusätzlichen Güteerme berücksichtigen:

- die begrenzte Fahrzeugdynamik: Hierzu werden Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck in Längs- und Querrichtung mit Grenzwerten verglichen. Dieser Güteerme berücksichtigt daher auch die geschwindigkeitsabhängige maximale Beschleunigung des Fahrzeugs sowie die vom Fahrer gewählte ACC-Geschwindigkeit.
- den Einfluss auf den rückwärtigen Verkehr: Hierzu wird das Verhalten des rückwärtigen Fahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen mithilfe des Intelligent Driver Models simuliert. Bewertet wird die Verzögerung des Fahrzeugs.
- die Situation am Ende des zweiten Segments: Belohnt wird hierbei eine möglichst große x-Position sowie Geschwindigkeit. Bestraft wird die Verzögerung am Endpunkt, die notwendig ist, um eine Kollision sowie Übertretung der gewählten Geschwindigkeit zu vermeiden.
- die Annäherung an die Sicherheitsbereiche.

Die einzelnen Güteerme werden gewichtet und zu einem gemeinsamen Gütemaß addiert. Der Downhill-Simplex-Algorithmus bestimmt schließlich die optimalen Parameter v_1 , v_2 , v_e , die zu einem minimalen Gütemaß führen.

5 ERGEBNISSE

Die Trajektorienplanung wurde in der Simulation in verschiedenen Situationen getestet. In **BILD 7** ist ein beispielhafter Verlauf eines Fahrstreifenwechsels vom rechten auf den linken Fahrstreifen dargestellt. Die Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen fahren dabei

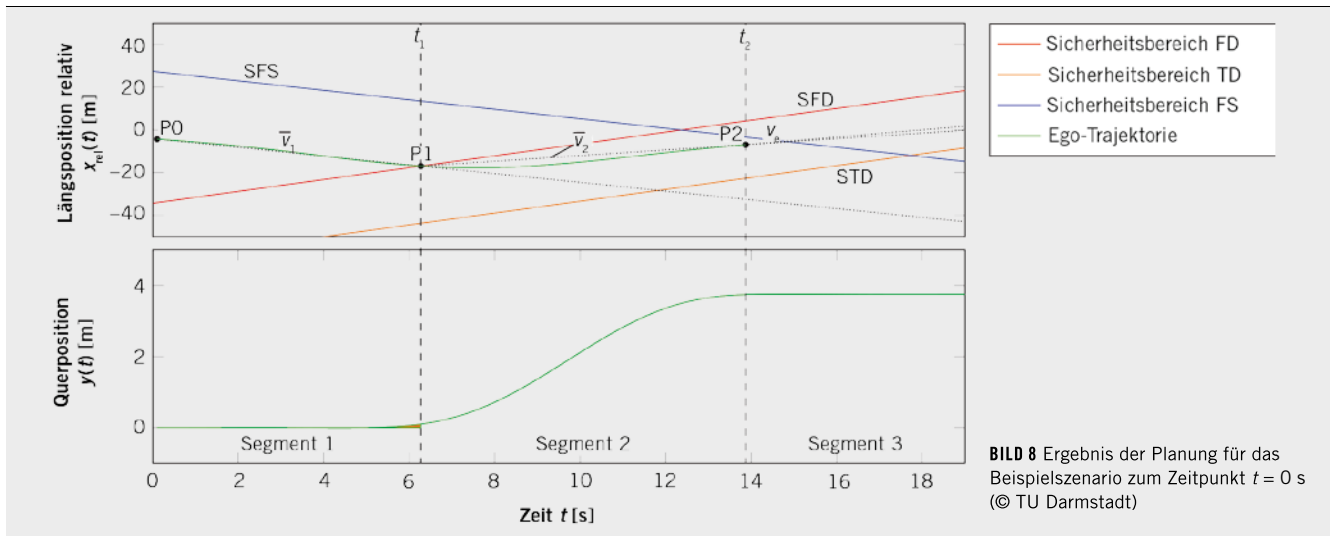


BILD 8 Ergebnis der Planung für das Beispielszenario zum Zeitpunkt $t = 0$ s (© TU Darmstadt)

schneller als der Lkw auf dem rechten Fahrstreifen. Die vollständige Fahrstreifenwechseltrajektorie konnte hierbei schon zum Zeitpunkt $t = 0$ geplant werden, **BILD 8**. Im weiteren Verlauf der Simulation wurde die Planung stetig an die aktuelle Umfeldsituation angepasst. Zur optimalen Beurteilung des Verhaltens, auch in anderen Szenarien, steht in [8] ein Video zur Verfügung. Des Weiteren wurde die Trajektorienplanung in einem Versuchsfahrzeug implementiert. Dabei konnte ihre Funktions- und Echtzeitfähigkeit auch in realen Fahrten gezeigt werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Der Artikel beschreibt ein rechenzeiteffizientes Verfahren zur komfortorientierten Trajektorienplanung von Fahrstreifenwechseln auf der Autobahn. Es ist dafür gedacht, mit seriennaher Sensorik auf in der Automobilindustrie üblichen Steuergeräten Trajektorien in Echtzeit zyklisch neu zu planen. Durch die Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeiten als Parameter für die Längstrajektorie ist es möglich, eine Trajektorie mit mehreren Segmenten zu verwenden, ohne die Rechenzeit stark steigen zu lassen. Die Quertrajektorie wird hierbei indirekt aus der Längstrajektorie und der Position und Geschwindigkeit der Umfeldfahrzeuge bestimmt. Die Längstrajektorie besteht aus zwei Polynomsegmenten, die Quertrajektorie aus zwei Polynomsegmenten sowie einer Matrix-Exponentialfunktion. Das erste Segment beschreibt die Anfahrt zur Lücke, das zweite Segment die Querbewegung und im letzten Segment wird die verbleibende Querabweichung ausgeregelt. Die Länge der Segmente ist nicht fest, sondern ergibt sich auch aus den Durchschnittsgeschwindigkeiten. Durch dieses Verfahren ist ein verhältnismäßig langer Planungshorizont möglich. Durch die mehrteilige Trajektorie ist es auch möglich, eine Trajektorie zu planen, bei der die Querbewegung erst zu einem späteren Zeitpunkt begonnen wird. Weder Position noch Geschwindigkeit am Endpunkt werden hierbei vorgegeben. Sie werden zusammen mit den Durchschnittsgeschwindigkeiten optimiert und sind nicht auf diskrete Werte beschränkt. Das Verfahren berücksichtigt die beschränkte Dynamik des Ego-Fahrzeugs sowie den Einfluss auf den rückwärtigen Verkehr. Die Trajektorienplanung wurde sowohl in der Simulation als auch im Versuchsträger getestet.

LITERATURHINWEISE

- [1] Ulmer, B.: VITA II-active collision avoidance in real traffic. In: Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium, 1994, S. 1-6
- [2] Werling, M.: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011
- [3] Rathgeber, C.; Winkler, F.; Müller, S.: Kollisionsfreie Längs- und Quertrajektorienplanung unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Potenziale. In: at-Automatisierungstechnik 64 (2016), Nr. 1, S. 61-76
- [4] Bauer, E.; Lotz, F.; Pfromm, M.; Schreier, M. et al.: Proreta 3: An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation. In: at - Automatisierungstechnik 60 (2012), Nr. 12, S. 755-765
- [5] Dang, T. et al.: Autonomes Fahren auf der historischen Bertha-Benz-Route. In: tm - Technisches Messen 82 (2015), Nr. 5, S. 280-297
- [6] Nelder, J. A.; Mead, R.: A Simplex Method for Function Minimization. In: The Computer Journal 7 (1965), Nr. 4, S. 308-313
- [7] Treiber, M.; Kesting, A.: Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Heidelberg/Berlin: Springer-Verlag, 2010
- [8] http://www.timhansen.de/publications/at/2016-07/video_de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.atz-worldwide.com