

Entwicklung der adaptiven lokalen Trajektorienplanung zur Realisierung des kollisionsfreien Fahrens in vernetzter Verkehrsumgebung

Jie Zhang^{1*}, Xiaobo Liu-Henke¹, Thomas Vietor²

¹Institut für Mechatronik Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Salzdhahmer Str. 46/48, 38302 Wolfenbüttel, Deutschland; *jie.zhang@ostfalia.de

²Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Hermann-Blenk- Str. 42, 38108 Braunschweig, Deutschland

Abstract. Der folgende Beitrag beschreibt die adaptive lokale Trajektorienplanung, welche als ein Teil der Trajektorienplanung des autonomen Fährbetriebs zur Kompensation der Unfähigkeit der globalen Trajektorienplanung bei Hindernisvermeidung in der dynamischen Verkehrsumgebung dient. Durch Integration der globalen und lokalen Trajektorienplanung wird eine optimale Trajektorie je nach Fahrstrategie (z.B. energieoptimal, zeitoptimal, distanzoptimal) ohne Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern durch stetige Anpassung an die sich ändernde Verkehrsumgebung generiert. Anhand einer Pilotanwendung mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) zum Materialtransport in der Intralogistik wird die entwickelte Funktion mithilfe eines virtuellen Prüfstandes abgesichert und aufgezeigt.

Einleitung

Zentraler Bestandteil des autonomen Fährbetriebs ist neben dem Folgen einer ausgewählten Route die effiziente und konfliktfreie Trajektorienplanung, die sich mit dem Problem befasst, wie eine Reihe von Verhaltensweisen für die Fahrzeugführung in verschiedenen Szenarien schnell und präzise festgelegt wird und es so in die Lage versetzt, auf die sich dynamisch ändernde Verkehrsumgebung richtig zu reagieren [1]. So wird ein kontinuierlicher Fahrweg auf Basis der gewählten Route in Form einer Folge von Knotenpunkten zur Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Bewegung eines Fahrzeugs inklusive Position, Fahrtrichtung und auch Translations- sowie Rotationsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Restriktionen des kinematischen sowie dynamischen

Verhaltens, ebenfalls unter Betrachtung der Zielkriterien (z.B. Energie, Sicherheit, Effizienz usw.), festgelegt, welche zur Optimierung der Fahrzeugführung beiträgt und als Führungsgröße einer Folgeregelung dient [2, 6]. Als Kopplungsglied der Zielführung mit der Fahrdynamikregelung steht die Leistung der Trajektorienplanung in direktem Zusammenhang mit der Fahrt von einer aktuellen Ist- zu einer vordefinierten Zielposition unter Beachtung der Geschmeidigkeit/Glätte des Fahrverhaltens.

Zur Erreichung des Ziels wird je nach der räumlichen und zeitlichen Dimension der Anwendungen und der Quelle der verfügbaren Verkehrsinformationen die Trajektorienplanung in zwei Teile, nämlich die globale und lokale Trajektorienplanung, unterteilt [3, 4]. Die globale Trajektorienplanung, auch statische Trajektorienplanung genannt, bezieht sich hauptsächlich auf die Bestimmung der Trajektorie zur Beschreibung der Positionen eines Fahrzeugs in Raum für die gesamte Fahrt von einer gegebenen Startposition bis zu einer Zielposition mit Hilfe der A-priori-Informationen, die durch eine digitale Karte bereitgestellt werden. Im Gegensatz dazu wird die lokale Trajektorieplanung, auch dynamische Trajektorienplanung genannt, als die Ermittlung des Übergangs der Fahrzeuge von einem Zustand in den nächsten in Echtzeit, basierend auf den über Mensch-Maschine-Interface (MMI) erfassten Komfortanforderungen und auf den Sensordaten oder verfügbaren Verkehrsinformationen durch V2X-Kommunikationstechnologie, der Fahrbahngrenzen, der Verkehrsregeln und der Hindernisse, insbesondere der dynamischen Hindernisse, welche in der globalen Trajektorienplanung mittels statischer Karte nicht vorhersehbar sind, definiert [3, 4, 5, 6].

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf die Entwicklung der adaptiven lokalen Trajektorienplanung zur Vermeidung von Konflikten mit nicht vorhersehbaren Hindernissen (z.B. andere Fahrzeuge im selben Verkehrsszenario). Durch dessen Integration mit der globaler Trajektorienplanung erfolgt die konfliktfreie Fahrzeugführung in einer dynamischen Verkehrsumgebung. Durch eine Anwendung in einem Fahrerlosen Transportsystem (FTF) zum autonomen Materialientransport in der Intra-logistik wird die entwickelte lokale Trajektorienplanung in der virtuellen Simulationsumgebung abgesichert und demonstriert.

1 Stand des Wissens

In diesem Abschnitt wird zunächst der Ansatz Dynamic Window Approach (DWA) zur lokalen Trajektorienplanung und dann die Entwicklungsmethodik zur durchgängig modellbasierten und verifikationsorientierten Funktionsauslegung und -absicherung vorgestellt.

1.1 Dynamic Window Approach

Wie bereits erwähnt, ist es nicht sinnvoll während der globalen Trajektorienplanung die dynamischen und/oder plötzlich erscheinenden Hindernisse mitzubedenken. Eine Berücksichtigung erfordert eine große Rechenleistung und beeinträchtigt somit die Echtzeitfähigkeit. Zur Bewältigung dieser Herausforderung wird die lokale Trajektorienplanung auf Basis der globalen Trajektorie als Referenz entwickelt. Die Effizienz der lokalen Trajektorie hängt weitgehend von den verwendeten Ansätzen zur lokalen Trajektorienplanung ab [4, 6, 7].

DWA, ein weit verbreiteter und bewährter sowie effizienter Ansatz, wird in dieser Arbeit als Grundlage für die Entwicklung der adaptiven lokalen Trajektorienplanung verwendet. DWA wandelt die Fahrzeugkörperposition in Zeit und Raum in Bestimmung einer optimalen Kombination $V(v, \omega)$ aus translatorischer und rotatorischen Geschwindigkeiten über einen bestimmten Zeitraum um, welcher als Prädiktionshorizont T bezeichnet wird [7]. Deshalb wird die Regelung der Fahrzeugposition über die Zeit als Regelung der Geschwindigkeit anhand des optimalen Geschwindigkeitsprofils $V(v, \omega)$ in Echtzeit umgesetzt. Mithilfe einer speziell für die Aufgabenstellung entworfenen Bewertungsfunktion erfolgt eine verständliche und effektive Beurteilung, ob die betreffenden lokalen Trajektorien L_x , die anhand von Geschwin-

digkeitskombinationen innerhalb des Prädiktionshorizontes berechnet werden (vgl. Abb. 1), grundsätzlich fähig sind, das Fahrzeug sein vorbestimmtes Ziel konfliktfrei und effizient erreichen zu lassen. Anschließend wird die optimale Trajektorie durch die quantifizierte Lösungsgüte ermittelt. Gegenüber anderen Ansätzen liegen die Vorteile von DWA insbesondere darin, dass die ermittelte Geschwindigkeitskombination V als Sollwerte an die unterlagerte Fahrdynamikregelung zur Ansteuerung des Fahrzeugaufbaus direkt weiter übertragen werden kann [7, 8].

Zur Ermittlung der lokalen Trajektorien soll zuerst der Lösungsraum V_L etabliert werden, welcher mit den folgenden drei Randbedingungen abgegrenzt wird:

- Die maximale Geschwindigkeit V_m wird nicht nur durch die Fahrzeugkinematik beeinflusst, sondern auch gesetzlich durch die Obergrenze der zulässigen Höchstgeschwindigkeit begrenzt.
- Die Realisierbarkeit der Geschwindigkeit V_r muss unter Berücksichtigung der verfügbaren Leistung zum Antreiben und Bremsen innerhalb einer Abtastzeit ΔT auf Basis der aktuellen Geschwindigkeit $V_0(v_0, \omega_0)$ überprüft werden.
- Um die Fahrzeugsicherheit zu gewährleisten, muss das Fahrzeug beim Abbremsen mit maximaler Verzögerung $(\dot{v}_{min}, \dot{\omega}_{min})$ auf null konfliktfrei mit Hindernissen bleiben. Daher wird die Sicherheitsgeschwindigkeit V_s durch Gl. 3 weiter eingegrenzt.

$$V_m = \{(v, \omega) | v \in [v_{min}, v_{max}], \omega \in [\omega_{min}, \omega_{max}]\} \quad (1)$$

$$V_r = \left\{ (v, \omega) \left| \begin{array}{l} v \in [v_0 + \dot{v}_{min} \cdot \Delta T, v_0 + \dot{v}_{max} \cdot \Delta T], \\ \omega \in [\omega_0 + \dot{\omega}_{min} \cdot \Delta T, \omega_0 + \dot{\omega}_{max} \cdot \Delta T] \end{array} \right. \right\} \quad (2)$$

$$V_s = \left\{ (v, \omega) \left| \begin{array}{l} v \leq \sqrt{2 \cdot dist(v_0, \omega_0) \cdot \dot{v}_{min}} \\ \omega \leq \sqrt{2 \cdot dist(v_0, \omega_0) \cdot \dot{\omega}_{min}} \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

$$V_L = V_m \cap V_r \cap V_s \quad (4)$$

Mit der vordefinierten Geschwindigkeitsauflösung $(\Delta v, \Delta \omega)$ wird der Lösungsraum V diskretisiert. Es ergeben sich insgesamt n_V Geschwindigkeitskombinationen bzw. Lösungen im Lösungsraum:

$$n_V = \frac{V(v, \omega)}{\Delta v} \cdot \frac{V(v, \omega)}{\Delta \omega} \quad (5)$$

Abbildung 1 stellt alle möglichen Trajektorien mit der Geschwindigkeit $V(v', \omega')$ des Lösungsraums V_L dar. Der Bewegungsbereich des Fahrzeuges innerhalb eines Prädiktionshorizontes wird durch die Trajektorien $L_{1,2,3,4}$ als Grenzen eingeschränkt. Es sei angenommen, dass die

Geschwindigkeit V innerhalb des Prädiktionshorizontes konstant bleibt.

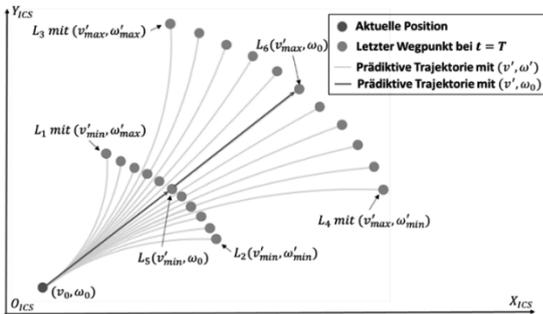


Abbildung 1: Prädiktion der lokalen Trajektorien innerhalb eines Prädiktionshorizontes T .

Zur Bemessung der Lösungsgüte und zum Festlegen der optimalen Trajektorie wird eine anwendungsspezifische Bewertungsfunktion entworfen, in der verschiedene Zielkriterien durch entsprechenden Kenngrößen quantifiziert und je nach Anwendungsfall unterschiedlich gewichtet werden, um die inkonsistenten Prioritäten der Zielkriterien bei der Auswahl der Trajektorie widerzuspiegeln.

Bei der lokalen Trajektorienplanung werden normalerweise die Zielkriterien Sicherheit, Zeit und Distanz, betrachtet. Zur Erfassung dieser werden die entsprechenden Kenngrößen, bestehend aus Orientierung θ , Fahrgeschwindigkeit \bar{v} und Abstand zu Hindernissen l_h , herangezogen. g_θ , $g_{\bar{v}}$ und g_{l_h} sind die jeweiligen Gewichtungsfaktoren dieser Kenngrößen. Über die Auslegung der Gewichtungsfaktoren können verschiedenen Fahrstrategien (z.B. energieoptimal, zeitoptimal, distanzoptimal) verfolgt werden, wobei die ausgewählte Strategie mit der globalen Trajektorienplanung konsistent sein muss; so besteht die Möglichkeit zur Individualisierung des Fahrbetriebs. Dieser Prozess wird sukzessive fortgesetzt, bis das Fahrzeug die Zielposition erreicht.

$$G(L) = g_\theta \cdot \theta(L) + g_{\bar{v}} \cdot \bar{v}(L) + g_{l_h} \cdot l_h(L) \quad (6)$$

1.2 Modellbasierter Entwicklungs- und Absicherungsprozess

Die durchgängig modellbasierte und verifikationsorientierte Funktionsauslegung und -absicherung (vgl. Abb. 2) hat sich für die Entwicklung mechatronischer Systeme durch Optimierungen, Tests und Verifikationen in frühen Entwicklungsphasen als zeit- und kosteneffiziente Methode erwiesen, welche Model-in-the-Loop- (MiL-), Software-in-the-Loop- (SiL-) und Hardware-in-the-

Loop- (HiL-) Simulationen sowie die Echtzeitrealisierung durch Prototypen beinhaltet.

Ausgehend von Anforderungen und Lastenheft erfolgt die MiL-Simulation, in welcher Regelalgorithmen ohne Anspruch auf Echtzeitfähigkeit entwickelt und an einem System- bzw. Streckenmodell gegen ein komplexes Umgebungsmodell anhand von Szenarien erprobt werden. Aus den simulativ erprobten Regelalgorithmen wird im Rahmen der SiL-Simulation mittels automatischer Code-Generierung ein ausführbarer Target-Code erzeugt, welcher wiederum mit einem Systemmodell auf Funktion und Fehler getestet wird. Daraufhin erfolgt die HiL-Simulation, bei welcher ein um physische Teilkomponenten ergänztes, echtzeitfähiges Dynamikmodell zur Funktionsabsicherung und -optimierung verwendet wird.

Mithilfe dieser Methodik wird eine durchgängige Entwicklung basierend auf virtuellen Prototypen bis zum fertigen Produkt sichergestellt. Dieser Beitrag stellt aus der Methodik schwerpunktmäßig die Entwicklung und Verifikation der lokalen Trajektorienplanung mittels MiL-Simulation dar.

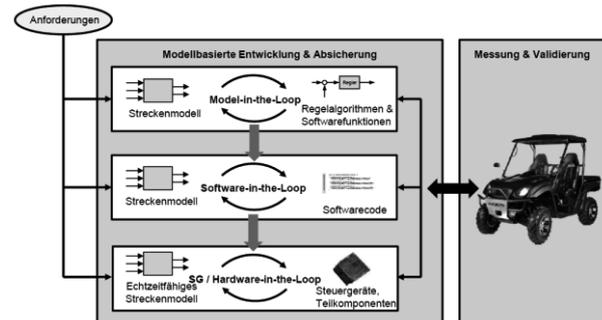


Abbildung 2: Durchgängig modellbasierte, verifikationsorientierte Entwicklungsmethodik nach [8].

2 Konzeption der adaptiven lokalen Trajektorienplanung

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die lokale Trajektorienplanung erhoben und definiert. Auf Basis dessen werden die Funktionsstruktur und auch die informationstechnischen Schnittstellen zur Integration mit anderen Funktionsmodulen eines autonomen Fahrzeugs konzipiert.

2.1 Definition der Anforderungen

Anhand der mechatronischen Entwicklungsmethodik sind zum einen die Anforderungen zur Festlegung der Funktion und Struktur in Form von Lastenheften und

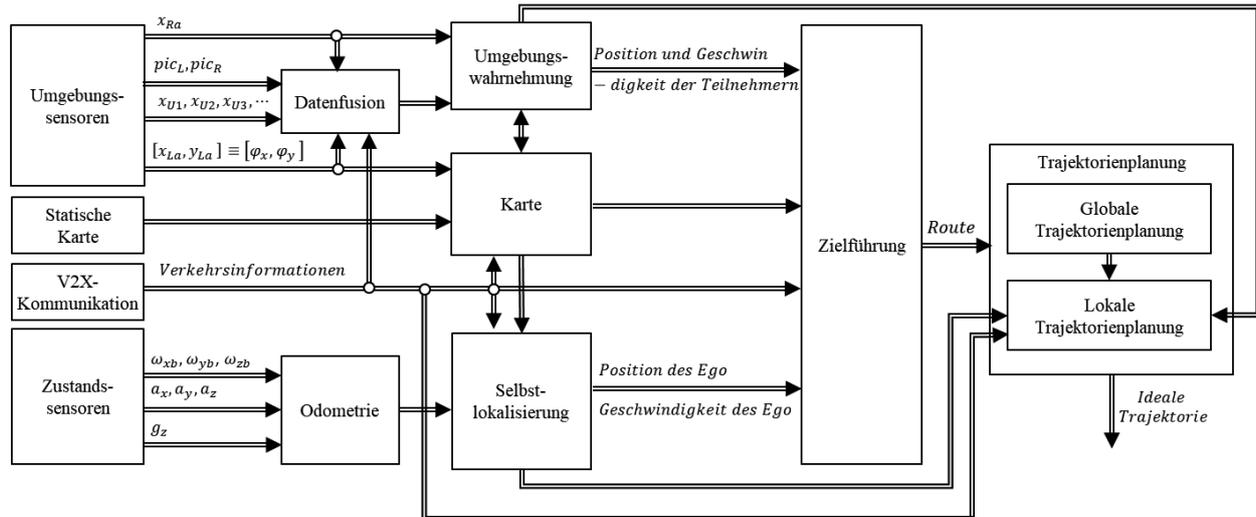


Abbildung 3: Funktionsstruktur eines autonomen Fahrzeugs zur Wahrnehmung, Planung und Entscheidungsfindung.

Spezifikationen erforderlich. Zum anderen dienen die Anforderungen als Vergleichsmaß bei der Funktionsabsicherung sowie Auswertung der Simulationsergebnisse [11, 12]. Ausgehend von der Analyse des Stands des Wissens und des angestrebten Anwendungsbereichs beim autonomen Fahren sowohl im offenen Straßenverkehr als auch in geschlossenen Produktionsumgebungen werden daher die folgenden wesentlichen Anforderungen an die adaptive lokale Trajektorienplanung definiert:

- Dynamische Anpassung an die sich ändernden Verkehrsumgebung
- Identifikation und Vermeidung potenzieller Konflikte
- Konsistente Fahrstrategie (z.B. energieoptimal, zeitoptimal, distanzoptimal) mit anderen Fahrfunktionen
- Einsatzbereitschaft für konfliktfreies autonomes Fahren in der Intralogistik und im Straßenverkehr
- Gewährleistung der Wiederverwendbarkeit, Parametrierbarkeit und Rekonfigurierbarkeit

2.2 Funktionsstruktur und Schnittstellendefinition

Anhand der Anforderungen werden die folgenden Teilfunktionen der lokalen Trajektorienplanung konzipiert. Deren Entwicklungsprozess wird im Abschnitt 3 weiter detailliert werden:

- **Identifizierung potenzieller Konflikte:** da sich die Fahrzeuge in einer sich ändernden Verkehrsumgebung befinden, sind vorübergehende Hindernisse, die nicht auf der Karte gespeichert wurden, wie z. B. plötzlich heruntergefallene Kisten oder sich plötzlich nähernde Verkehrsteilnehmer, nicht vorhersehbar. Daher muss

das Fahrzeug die Hindernisse mittels On-Board-Sensorsystemen oder V2X-Kommunikation erkennen und so die potenziellen Konflikte identifizieren.

- **Festlegung der lokalen Trajektorien zur Konfliktvermeidung:** Anhand der durch die Fahrstrategie ermittelten Zielkriterien wird eine anwendungsspezifische Bewertungsfunktion entworfen. Mithilfe der Bewertungsfunktion wird die am besten geeignete lokale Trajektorie aus dem Lösungsraum als spezifische Ausführungslösung für einen Abschnitt der globalen Trajektorie festgelegt.

Zur Integration der lokalen Trajektorienplanung in die Funktionsstruktur eines autonomen Fahrzeugs werden die Schnittstellen zum Informationsaustausch, wie in Abbildung 3 dargestellt, anhand der aufgeführten Anforderungen definiert.

3 Entwicklung

Die im Abschnitt 2 konzipierten Funktionen sollen modellbasiert entwickelt werden. Deren Entwicklungsprozess wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Bei der lokalen Trajektorienplanung werden auf Basis des aktuellen Fahrzeugzustands $\underline{p}_0 [x_0, y_0, \theta_0, v_0, \omega_0]^T$ zum Zeitpunkt $t = 0$ und dem Fahrzeugmodell alle möglichen Trajektorien \underline{L} mit einer zukünftigen Geschwindigkeit $V(v', \omega')$ innerhalb eines Prädiktionshorizontes T innerhalb einer Abtastzeit ΔT generiert. Hierbei wird die Trajektorie \underline{L} durch eine Reihe von Fahrzeugzuständen diskret dargestellt. Die folgende Abbildung 4 veranschaulicht den Vorgang.

$$\underline{\underline{L}}(t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_n \\ v' & v' & \dots & v' \\ \omega' & \omega' & \dots & \omega' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{P}_1 & \underline{P}_2 & \dots & \underline{P}_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

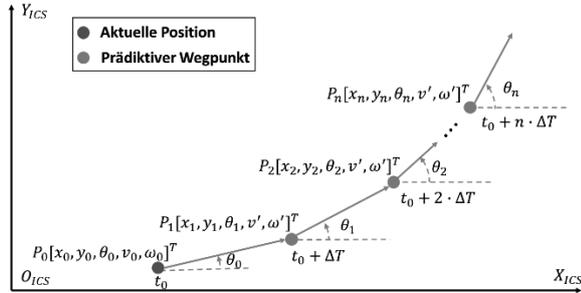


Abbildung 4: Diskrete lokale Trajektorie mit Geschwindigkeit $V(v', \omega')$ innerhalb eines Prädiktionshorizontes T .

Wie bereits erwähnt, wird hierbei zur Quantifizierung der Lösungsgüte der Trajektorien eine anwendungsspezifische Bewertungsfunktion (vgl. Gl. 6) verwendet. Obwohl durch Einstellung des Gewichtungsfaktors g_{l_h} des Zielkriteriums Sicherheit die meisten konflikthafte Trajektorien ausgefiltert werden können, ist es schwierig, durch die Bewertungsgleichung eine absolut konfliktfreie Trajektorie auszuwählen, da die Bewertungsgleichung darauf abzielt, einen Kompromiss der definierten Zielkriterien zu finden und somit eine systematische Optimierung zu erreichen. Zur Bewältigung dieser Schwachstelle werden die in der Bewertungsfunktion betrachteten Zielkriterien je nach Priorität in zwei Gruppen unterteilt. Zum einen gibt es harte Anforderungen (z.B. Sicherheit), welche nicht verhandelbar sind und auf jeden Fall erfüllt werden müssen. Die zweite Gruppe von Zielkriterien wird als weiche Anforderungen (z.B. Zeit, Distanz und Energie) bezeichnet, welche bei Ausführung der Fahrfunktionen zur Abwicklung der Transportaufträge im Interesse eines besseren Gesamtergebnisses hauptsächlich durch Abstimmung der Gewichtungsfaktoren kompromittiert werden. Sie werden nur dann thematisiert, wenn die harten Anforderungen bereits erfüllt sind. Zur klaren Unterscheidung der beiden Arten von Anforderungen wird die Bewertungsfunktion wie in Gl. 8 umformuliert, wobei S der vordefinierte Sicherheitsabstand ist, sodass konfliktbehaftete lokale Trajektorien direkt aus dem Lösungsraum herausgefiltert werden und damit das Zielkriterium Sicherheit als harte Anforderung immer erfüllt wird.

$$G(L) = g_{l_h} \cdot (g_\theta \cdot \theta(L) + g_{\bar{v}} \cdot \bar{v}(L)) \quad (8)$$

mit

$$g_{l_h} = \begin{cases} 0, & l_h(L) \leq S \\ 1, & l_h(L) > S \end{cases} \quad (9)$$

Da der Wertebereich der Kenngrößen der jeweiligen Zielkriterien unterschiedlich ist, müssen diese zum Vergleich miteinander mit einer geeigneten Skalierung normiert werden (beispielsweise die Normierung der Kenngröße Orientierung vgl. Gl. 10). Somit ergibt sich die normierte Bewertungsgleichung (vgl. Gl. 11):

$$\theta_{nor}(L_i) = \frac{\theta_{max} - \theta(L_i)}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (10)$$

$$\theta_{max} = \max [\theta(L_1), \theta(L_2), \dots, \theta(L_{n_{vw}})]$$

$$\theta_{min} = \min [\theta(L_1), \theta(L_2), \dots, \theta(L_{n_{vw}})]$$

$$G(L) = g_{l_h} \cdot (g_\theta \cdot \theta_{nor}(L) + g_{\bar{v}} \cdot \bar{v}_{nor}(L)) \quad (11)$$

Hierbei wird der Prädiktionshorizont T als eine konstante Zeiteinheit zur Beschreibung der zukünftigen Trajektorien verwendet, was dazu führt, dass das Fahrzeug mit der lokalen Trajektorie im letzten Trajektorienabschnitt an der Zielposition nicht genau anhalten kann und daher, wie in der Abbildung 5 veranschaulicht, eine unvermeidbare Abweichung Δl zwischen der Anfangsposition P_0 des letzten Prädiktionshorizontes und der Zielposition P_z existiert.

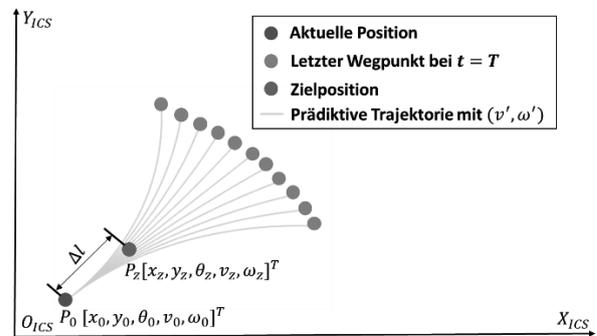


Abbildung 5: Abweichung zwischen P_0 und P_z mit einem konstanten Prädiktionshorizont T im letzten Trajektorienabschnitt.

Es sei angenommen, dass im letzten Schritt die Fahrzeugbewegung wie eine lineare Bewegung wegen des kleinen Zeitintervalls behandelt wird und die Abweichung Δl sich aus dem Abstand zwischen P_0 und P_z ergibt (vgl. Gl. 12). Da die Fahrzeuggeschwindigkeit bis zum Erreichen der Zielposition auf null reduziert werden sollte, entspricht die höchste lineare Geschwindigkeit des Fahrzeugs im letzten Trajektorienabschnitt der linearen Geschwindigkeit am Anfang des Prädiktionshorizontes

v_0 . Daher wird ein letztendlicher Prädiktionshorizont T' des letzten Trajektorienabschnittes ermittelt. Der Prädiktionshorizont T wird somit während der lokalen Trajektorienplanung abhängig von der Abweichung Δl umgeschaltet (Gl. 14).

$$\Delta l = v_0 \cdot T' = \sqrt{(x_0 - x_z)^2 - (y_0 - y_z)^2} \quad (12)$$

$$T' = \frac{\sqrt{(x_0 - x_z)^2 - (y_0 - y_z)^2}}{v'} \quad (13)$$

$$T = \begin{cases} T, & \Delta l > v_0 \cdot T \\ T', & \Delta l \leq v_0 \cdot T \end{cases} \quad (14)$$

In komplexen Szenarien mit zahlreichen Teilnehmern, insbesondere für Fahrzeuge in dicht besiedelten Wohngebieten oder freinavigierende FTF in einer kompakten Produktionsumgebung, neigen trotz lokaler Trajektorienplanung zur Konfliktvermeidung mit dynamischen Hindernissen oft dazu, in Sackgassen zu geraten. Obwohl es bei der Ermittlung der lokalen Trajektorie möglich ist, die Fahrtrichtung eines Fahrzeugs zu ändern, muss die Gewichtung der einzelnen Terme in der Bewertungsfunktion kompromittiert werden. In diesem Fall sollte die Orientierung θ_{nor} relativ klein sein, was dem ursprünglichen Konzept widerspricht, dass zur Vermeidung von Umwegen die Orientierung θ_{nor} so groß wie möglich sein sollte, um somit das Fahrzeug direkt in Richtung der Zielposition fahren zu lassen. Deswegen ist es schwierig für ein Fahrzeug sich selbständig durch die lokale Trajektorienplanung mit Gl. 11 aus einer Sackgasse zu befreien, sobald es in diese geraten ist (vgl. die rote Trajektorie in Abb. 6).

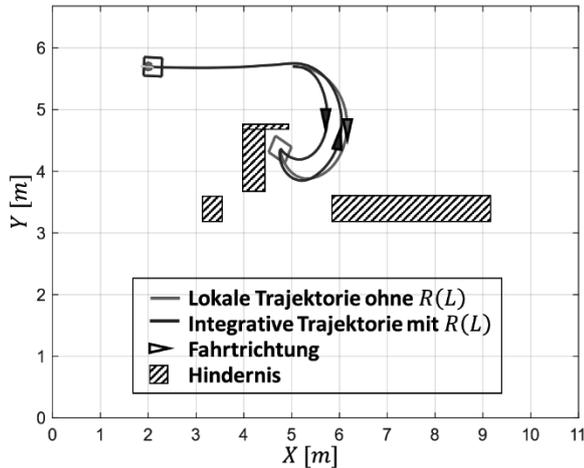


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Fahrzeugs in einer Sackgasse.

Zur Beseitigung des oben genannten Problems wird die Bewertungsfunktion um einen vierten Teil R zur

Adaption der Fahrtrichtung ausschließlich bei Sackgassen erweitert. Es ist auffällig, dass θ_{nor} und R sich gegenseitig ausschließen sollten, was durch Konfiguration der entsprechenden Gewichtungsfaktoren bzw. g_θ und g_ω realisiert wird. Falls es keine gangbaren Trajektorien zur Auflösung der Konflikte gibt, d.h. die lineare Geschwindigkeit \bar{v} der potenziellen Trajektorien ein Lösungsraum gleich null ist, muss sich das Fahrzeug zur Änderung der Fahrtrichtung um die eigene Hochachse drehen und der Gewichtungsfaktor g_ω einen geeigneten Wert C_1 annehmen. Sobald eine praktikable Trajektorie zur Ausfahrt der Sackgasse vorliegt, soll im Gegensatz dazu der Gewichtungsfaktor g_ω wieder zu null angenommen werden. Die lokale Trajektorienplanung mit und ohne Erweiterung von R wird in der Abbildung 6 gegenübergestellt und untenstehend veranschaulicht.

$$G(L) = g_{l_h} \cdot (g_\theta \cdot \theta_{nor}(L) + g_v \cdot \bar{v}_{nor}(L) + g_\omega \cdot R(L)) \quad (15)$$

mit

$$R(L) = |\omega'| \quad (16)$$

$$\begin{cases} g_\theta = 0, g_\omega = C_1, & \forall [\bar{v}(L_1), \bar{v}(L_2), \dots, \bar{v}(L_{n_{vw}})] = 0 \\ g_\theta = C_2, g_\omega = 0, & \exists [\bar{v}(L_1), \bar{v}(L_2), \dots, \bar{v}(L_{n_{vw}})] \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

Hierbei ist zu beachten, falls die lineare Geschwindigkeit einen zu großen Wert annimmt, biegt das Fahrzeug mit einem großen Kreis zum Ausweichen der Hindernisse ab (vgl. Abb. 7). Dieses Dilemma kann einerseits überwunden werden, durch Änderung des Gewichtungsfaktors g_v und andererseits indem das Vorzeichen (positive oder negative Richtung) des Gewichtungsfaktors in Abhängigkeit des Zustands des Fahrzeugs dynamisch angepasst wird. Unter Berücksichtigung des höheren Zeitaufwands und höheren benötigten Rechenleistung zur dynamischen Anpassung des Gewichtungsfaktors durch Online Training wird hier der zweite Ansatz zur dynamischen Anpassung des Vorzeichens der Gewichtungsfaktoren in die Bewertungsgleichung eingeführt, wodurch der übermäßige Einfluss eines bestimmten Faktors auf die Bewertungsfunktion unter speziellen Umständen unterdrückt und eine übermäßige Lenkhäufigkeit des Fahrzeugs reduziert wird.

Die auslösende Bedingung zur Umschaltung des Vorzeichens von g_v wird durch die Randbedingungen (vgl. Gl. 20), die sich aus den Orientierungswinkeln $\Delta\theta[L_i(P_{j+1}), L_i(P_j)]$ und der linearen Geschwindigkeit v' zusammensetzen, deklariert. Hierbei wird v_c als

Schwellenwert betrachtet und experimentell oder durch den Optimierungsprozess bestimmt. Sobald die lineare Geschwindigkeit v' der Trajektorie L_i den Schwellenwert v_c überschreitet und gleichzeitig die Trajektorie von der vordefinierten Zielposition weg orientiert ist, wird das Vorzeichen von dem zweiten Zielkriterium $\bar{v}_{nor}(L_i)$ negativ, was zu einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit diese Trajektorie L_i zu wählen führt. Abbildung 7 stellt den Einfluss des Vorzeichenwechsels des zweiten Zielkriteriums auf die lokale Trajektorienplanung dar. Die Trajektorien mit zu großer linearer Geschwindigkeit, die sich in der Richtung weg von der vordefinierten Zielposition orientieren, werden so herausgefiltert.

$$\begin{aligned} \Delta\theta[L_i(P_{j+1}), L_i(P_j)] \\ = \arctan\left(\frac{y_z - y_{P_{j+1}}}{x_z - x_{P_{j+1}}}\right) - \arctan\left(\frac{y_z - y_{P_j}}{x_z - x_{P_j}}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$Q(L) = g_{L_h} \cdot [g_h \cdot \theta_{nor}(L) + g_v \cdot \bar{v}_{nor}(L) + g_\omega \cdot R(L)] \quad (19)$$

$$\begin{cases} g_v, & \neg(v' > v_c \cap \Delta\theta[L_i(P_{j+1}), L_i(P_j)] < 0) \\ -g_v, & v' > v_c \cap \Delta\theta[L_i(P_{j+1}), L_i(P_j)] < 0 \end{cases} \quad (20)$$

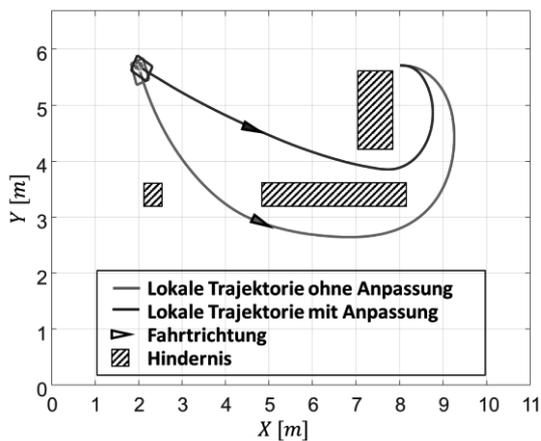


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Einflusses vom Vorzeichenwechsel des zweiten Terms auf die lokale Trajektorienplanung.

Um sicherzustellen, dass die in der globalen Trajektorienplanung eingesetzte Fahrstrategie in der lokalen Trajektorienplanung konsistent beibehalten und nicht abgeschwächt wird, um den Rechenaufwand zu reduzieren, und um sicherzustellen, dass die bereits in der Karte gespeicherten stationären Hindernisse in der lokalen Trajektorienplanung nicht doppelt gerechnet werden, (d.h. sie wurden bereits in der globalen Trajektorienplanung berücksichtigt), sollen die globale und lokale Planung synergetisch miteinander integrieren werden, indem die diskreten Wegpunkte der globaler Trajektorie als

Subziele der lokalen Trajektorienplanung verwendet werden. Es sei dabei vorausgesetzt, dass die Länge der in der Abbildung 8 dargestellten integrativen Trajektorie viel kleiner ist als die der vollständigen lokalen Trajektorie. Somit ist auch die Transportzeit der integrativen Trajektorie vom Start- bis zur Zielposition geringer.

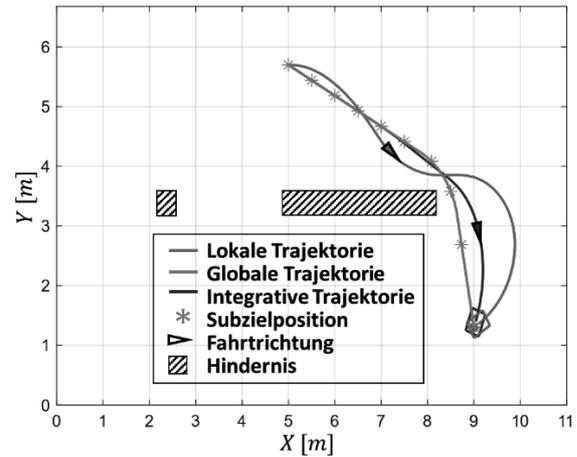


Abbildung 8: Gegenüberstellung der globalen, lokalen und integrativen Trajektorienplanung.

4 Funktionsabsicherung

4.1 Szenariobeschreibung

Mit Hilfe des virtuellen Prüfstandes werden die entwickelte Funktion und deren Synergien mit anderen Fahr-funktionen in einer realistischen Simulationsumgebung verifiziert und optimiert. Abbildung 9 stellt das Konzept des cyber-physisches Industrie-4.0-Labortestfeldes, welcher zur realitätsnahen Entwicklung und vor allem Erprobung der FTF, der IoT-basierten Kommunikation in Produktionsanlagen sowie der selbstoptimierten Intralogistik und Produktionsplanung konzipiert und entwickelt wird, im virtuellen Prüfstand dar, wobei eine Produktionsanlage mit drei Produktionsmaschinen, zwei Lagern, einem Warenausgang und vier autonomen FTF simuliert wird. Bei der Funktionsabsicherung werden 120 Transportaufträgen (TA) zufällig generiert und die FTF sollen selbst eine Trajektorie zwischen der Start- und Zielposition eines TA berechnen und konfliktfrei die Zielposition in einer dynamischen Verkehrsumgebung erreichen.

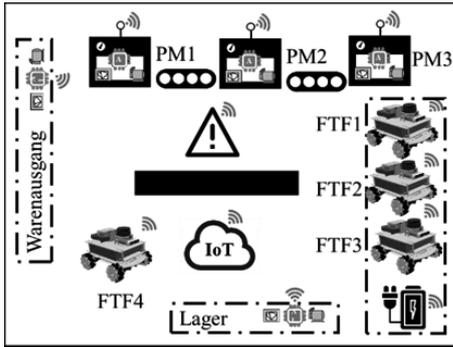


Abbildung 9: Cyber-physisches Industrie-4.0-Labortestfeld nach [13].

4.2 Simulationsergebnisse

Abbildung 10 stellt einen Ausschnitt aus dem Prozess der TA-Abwicklung mit vier FTF dar. Es ist ersichtlich, dass zur Vermeidung der Konflikte zwischen den einzelnen FTF die ausgeführten Trajektorien mithilfe der lokalen Trajektorienplanung während des Transports je nach Konfliktart in unterschiedlichem Maße von den entsprechenden globalen Trajektorien abweichen. Beispielsweise fahren FTF3 und FTF4 in entgegengesetzte Richtung und die globalen Trajektorien überschneiden sich teilweise. Um Konflikte zu vermeiden, kann FTF4 mit höherer TA-Priorität durch Abstimmung der FTF untereinander weiterhin der ursprünglich geplanten Trajektorie folgen, aber aufgrund einer drohenden Kollision mit FTF2 muss FTF4 von der globalen Trajektorie abweichen. Anhand dieser Simulationsergebnisse werden alle TA konfliktfrei ausgeführt.

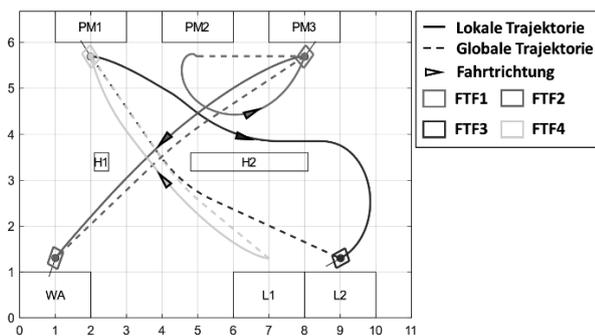


Abbildung 10: Ein Ausschnitt aus dem Prozess der TA-Ausführung durch FTF.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird die adaptive lokale Trajek-

torienplanung mittels DWA zur Konfliktvermeidung insbesondere mit den dynamischen Akteuren konzipiert und entwickelt, sodass die Sicherheit der Fahrzeuge in der sich ändernden Verkehrsumgebung stetig gewährleistet wird. Durch Festlegung der Gewichtungsfaktoren ermöglicht diese darüber hinaus, konsistent bei der verwendeten Fahrstrategie und der Konfliktlösung zu bleiben. Mithilfe des Testszenarios wird die Funktionalität der adaptiven lokalen Trajektorienplanung in der Simulationsumgebung validiert und demonstriert.

Es sei bemerkt, dass Hauptprobleme bei der Entwicklung der lokalen Trajektorienplanung mittels DWA der Entwurf der anwendungsspezifischen Bewertungsfunktion mit tauglichen Zielkriterien und die Festlegung der Gewichtungsfaktoren, welche die Leistungsfähigkeit und Effizienz der lokalen Trajektorienplanung weitgehend bestimmen, sind. Im nächsten Schritt werden zur Verbesserung deren Leistungsfähigkeit die Gewichtungsfaktoren durch KI-Methoden systematisch optimiert werden.

Danksagung

Gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur unter Fördernummer ZN3495 im Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung und betreut vom Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN).



References

- [1] Zhang J, Liu-Henke X. *Konfliktfreie, selbstoptimierte Trajektorienplanung für ein fahrerloses Transportfahrzeug zur Durchführung des autonomen Gütertransportes im Produktionsumfeld*. 25. Symposium Simulationstechnik - ASIM 2020, virtuelle Tagung, October 14 - 15 2020.
- [2] Göllner M, Jacobitz S, Li T, Liu-Henke X. *Modular Platform for Route Guidance in the Cyber-Physical Laboratory Test Field*. ASIM STS/GMMS & EDU Workshop 2022, July 25 - 26, Wien Österreich, 2022.
- [3] Li X, Hu X, Wang Z, Du Z. *Path Planning Based on Combination of Improved A-STAR Algorithm and DWA Algorithm*. 2020 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM), Manchester, United Kingdom, 2020, pp. 99-103, doi: 10.1109/AIAM50918.2020.00025.
- [4] Liang CL, Zhang XK, Han X. *Route planning and track keeping control for ships based on the leader-vertex ant*

- colony and nonlinear feedback algorithms*. Applied Ocean Research, 2020, Vol. 101, doi: 10.1016/j.apor.2020.102239.
- [5] Scherler S. *Zeit- und energieoptimierter Fahrbetrieb eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzellen-Range-Extender im digital vernetzten Verkehr* [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig, 2022.
- [6] Cai JC, Wan MF, Huang ZL, Liu Y. *An Improved DWA Path Planning Algorithm Integrating Global JPS Strategy*. 2022 2nd International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR), Shanghai, China, 2022, pp. 20-26, doi: 10.1109/ICCCR54399.2022.9790216.
- [7] Xiong B, Jiang HK, Cui JJ, Lu K, Chen PY, Zhang M. *UAV Path Planning Based on Improved A* and DWA Algorithms*. International Journal of Aerospace Engineering. 2021, Vol. 2021, doi: 10.1155/2021/4511252.
- [8] Fox D, Burgard W, Thrun S. *The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance*. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2002, 4(1):23-33.
- [9] Liu-Henke X, Jacobitz S, Scherler S, Göllner M, Yarom O, Zhang J. *A Holistic Methodology for Model-Based Design of Mechatronic Systems in Digitized and Connected System Environments*. 16th International Conference on Software Technologies (ICSOFT), Online, July 6-8, 2021.
- [10] Zhang J, Liu-Henke X. *Virtueller Prüfstand zur simulationsgestützten Bewertung von cyber-physischen Industrie-4.0-Lösungen*. Virtueller ASIM STS/GMMS & EDU Workshop 2021, March 11 - 12, 2021.
- [11] Inkermann D, Huth T, Vietor T, Grewe A, Knieke C, Rausch A. *Model-Based Requirement Engineering to Support Development of Complex Systems*. Procedia CIRP, 84, pp 239-244, 2019 doi: 10.1016/j.procir.2019.04.345.
- [12] Yarom OA, Zhang J, Raulf C, Liu-Henke X, Vietor T. *Anforderungsmanagement für die modellbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme im digitalisierten und vernetzten Umfeld*. 25. Symposium Simulationstechnik ASIM 2020, virtuelle Tagung, October 14 – 15 2020, pp 213-220, doi:10.11128/arep.59.a59029.
- [13] Jacobitz S, Göllner M, Zhang J; Yarom OA, Liu-Henke X. *Seamless Validation of Cyber-Physical Systems Under Real-Time Conditions by Using a Cyber-Physical Laboratory Test Field*. IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE), Online, December 12-14, 2021.