



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit
Jonas Winter
Trajektorienplanung für ein autonomes
Modellauto

Trajektorienplanung für ein autonomes Modellauto

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

an der

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Studiengang Mechatronik

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jochen Maaß
2. Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann

Eingereicht von: Jonas Winter
Matrikelnummer: 2165473
Datum der Abgabe: 15.09.2017

Jonas Winter

Thema der Bachelorarbeit

Trajektorienplanung für ein autonomes Modellauto

Stichworte

autonomes Fahren, Modellauto, Trajektorienplanung, Online-Berechnung, Carolo-Cup

Kurzzusammenfassung

Die Bachelorarbeit befasst sich mit der Berechnung einer annähernd zeit-optimalen Trajektorie für ein autonomes Modellauto. Die Trajektorienplanung wird für eine bestehende Fahrzeugplattform vorgenommen und ist für die Aufgaben des Studierendenwettbewerbs Carolo-Cup optimiert. Nach der Entwicklung des Konzepts wird dieses implementiert und auf dem Modellauto getestet.

Jonas Winter

Title of the paper

Trajectory planning for an autonomous model car

Keywords

autonomous driving, model car, trajectory planning, online calculation, Carolo-Cup

Abstract

The Scope of this thesis is the calculation of a nearly time-optimal trajectory for an autonomous model car. The trajectory planning targets an existing model car and is optimized for the tasks of the student competition Carolo-Cup. The developed concept was implemented and tested.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich bei allen bedanken, die auf die eine oder andere Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Als Erstes möchte ich meinem betreuenden Professor Prof. Dr.-Ing. Jochen Maaß für die Betreuung dieser Arbeit danken. Die konstruktiven Gespräche in den regelmäßigen Treffen haben viele spannende Ideen hervorgebracht und stets Spaß gemacht. Ebenso möchte ich Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann für die Übernahme des Amtes als Zweitprüfer danken.

Weiterhin möchte ich meinen Teamkollegen Markus Baisch, Florian Dannenberg sowie Martin Gosch danken. Sie haben es mir ermöglicht mit meiner Arbeit auf dem bisherigen Stand der Entwicklung aufzubauen und mich mit Anregungen und konstruktiver Kritik unterstützt.

Auch möchte ich mich bei allen bedanken, die diese Arbeit gelesen und mich mit Anmerkungen und Änderungsvorschlägen unterstützt haben. Insbesondere bei Dorle Osterode, die viel Zeit, Energie und Nerven in das Korrekturlesen dieser Arbeit investiert hat.

Ein besonderer Dank geht an meine Kommilitonen Daniel Neutzler, Sven Hartmann und Johannes Reichert für die fantastische Zusammenarbeit über das gesamte Bachelorstudium. Es war mir eine Freude mit euch gemeinsam die Herausforderungen des Bachelorstudiums zu bewältigen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
List of Algorithms	X
Glossar	XI
1 Einführung	1
1.1 Der Carolo-Cup	1
1.2 Motivation	3
2 Vorstellung der Fahrzeugplattform	4
2.1 Hardware	5
2.1.1 Sensorik	5
2.1.2 Datenverarbeitung	7
2.1.3 Aktorik	7
2.2 Software	8
2.2.1 Bildverarbeitung	9
2.2.2 Abbildung der Umwelt	11
2.2.3 Interpretation und Kontext	11
2.2.4 Trajektorienplanung	12
2.2.5 Programmlaufzeit	12
3 Konzeptentwicklung	14
3.1 Modellprädiktive Regelung	14
3.2 Zufallsbasierte Planungsansätze	15
3.3 Diskrete Bahnanalyse mit anschließender Geschwindigkeitsplanung	19

4	Analyse des Streckenverlaufs	21
4.1	Krümmung der Strecke	21
4.2	Die Partikelkette	22
4.3	Positionsaktualisierung der Partikel	22
4.4	Berechnung der Krümmung	24
4.5	Aufbereitung der Krümmungsdaten	25
4.5.1	Mittelwertbildung	26
4.5.2	Aufsummierung	28
5	Synthese einer annähernd zeitoptimalen Trajektorie	30
5.1	Individuelle Abschnittsgeschwindigkeiten	30
5.1.1	Maximal mögliche Geschwindigkeit in Kurven	31
5.1.2	Maximal mögliche Geschwindigkeit auf Geraden	33
5.1.3	Stationäre Grenzen der Trajektorienplanung	33
5.1.4	Aktualisierung der Abschnittsgeschwindigkeiten	33
5.2	Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik	35
5.2.1	Übertragung der Planung in den Zeitbereich	38
5.2.2	Addition von Längs- und Querkräften am Reifen	39
5.2.3	Anpassung des Geschwindigkeitsprofils	39
5.2.4	Verbesserte Schätzung der erwarteten Ankunftszeit	42
5.2.5	Sonderfälle bei der Anpassung des Geschwindigkeitsprofils	42
6	Ergebnisse	44
6.1	Analyse des Streckenverlaufs	44
6.1.1	Einzelne fehlerhafte Spurberechnungen	44
6.1.2	Kurzzeitig detektierte Streckenabschnitte	45
6.2	Erzeugte Geschwindigkeitsprofile	46
6.2.1	Gerade	47
6.2.2	Übergang Gerade zu Kurve	48
6.2.3	Kurve	49
6.2.4	Übergang Kurve zu Gerade	50
6.2.5	Gezieltes Anhalten	51
6.3	Rundenzeiten	52
6.4	Geschwindigkeitsprofil für die Teststrecke	53

6.5	Programmlaufzeit	53
7	Bewertung der Ergebnisse	55
7.1	Partikelkette zur Analyse des Streckenverlaufs	55
7.2	Qualität der Geschwindigkeitsprofile	56
7.3	Parameterbestimmung für die Geschwindigkeitsplanung	56
7.4	Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit	58
7.5	Begrenzung von Schlupf	58
8	Fazit	59
8.1	Zusammenfassung	59
8.2	Ausblick	60
	Literaturverzeichnis	I
	Software	III
	Versicherung über die Selbstständigkeit	IV

Abbildungsverzeichnis

1.1	Strecke des Carolo-Cups 2016	2
2.1	Fahrzeugplattform des Teams NaN	4
2.2	Zugeschnittenes Kamerabild während der Fahrt	6
2.3	Interaktion der Hardwarekomponenten des Fahrzeugs	8
2.4	Architektur der Fahrzeugsoftware	9
2.5	Transformation des Kamerabildes (vgl. Abb. 2.2) in die Draufsicht	10
2.6	Ergebnis der Liniensuchalgorithmen [Drauschke, 2016]	11
3.1	Wachstum eines 2D rapidly exploring random trees [Yang et al., 2014]	17
4.1	Schematische Darstellung der Partikelkette entlang der Fahrspur	23
4.2	Benötigte Informationen zur Berechnung der Krümmung	25
4.3	Fehlerhafte Positionierung des Partikels P_2	26
4.4	Partikelkette in einer Linkskurve	27
4.5	Krümmungswerte der Streckenabschnitte in einer Linkskurve (vgl. Abb. 4.4)	27
4.6	Partikelkette im Übergang zwischen einer Geraden und einer Rechtskurve	29
4.7	Aufsummierte Krümmungswerte zur Unterscheidung von Gerade und Kurve	29
5.1	An den Reifen angreifende Kräfte	32
5.2	Stationäre Grenzen der Trajektorienplanung nach Spenko et al. [2006]	34
5.3	Geschwindigkeits-Weg Diagramm bei konstanter Beschleunigung	36
5.4	Steckenverlauf mit qualitativem Geschwindigkeitsprofil	37
5.5	Addition von Längs- und Querkraften am Reifen	40
6.1	Ausgleich einer fehlerhaften Spurberechnung durch die Partikelkette	45
6.2	Speicherung nur kurzzeitig detektierter Abschnitte durch die Partikelkette	45
6.3	Geschwindigkeitsprofil entlang einer Geraden	47

6.4	Geschwindigkeitsprofil an dem Übergang von Gerade zu Kurve	48
6.5	Geschwindigkeitsprofil in einer Linkskurve	49
6.6	Geschwindigkeitsprofil an dem Übergang von Kurve zu Gerade	50
6.7	Geschwindigkeitsprofil bei gezieltem Anhalten	51
6.8	Carolo-Cup Teststrecke der HAW Hamburg	52
6.9	Geschwindigkeitsprofil für die Teststrecke der HAW Hamburg	54

List of Algorithms

1	Positionsaktualisierung der Partikel	24
2	Berechnung der maximal möglichen Geschwindigkeiten für Steckenabschnitte	31
3	Anpassung des Geschwindigkeitsprofils an die Fahrzeugdynamik	41

Glossar

Krümmung Eine bogenförmige Abweichung von einem geraden Verlauf. Für einen Kreisbogen entspricht die Krümmung dem Kehrwert des Radius. Einheit: 1/m.

online Meint die Ausführung während der Fahrt, ausschließlich unter Verwendung der Hardware, die auf dem Fahrzeug vorhanden ist.

Partikel Ein Partikel repräsentiert im Rahmen dieser Arbeit einen ca. 20 cm langen Streckenabschnitt.

Partikelkette Abbildung des Streckenverlaufs anhand dessen die Strecke analysiert und die Geschwindigkeit geplant wird.

1 Einführung

Seit einigen Jahren treten studentische Teams der HAW Hamburg beim Carolo-Cup der Technischen Universität Braunschweig an. Ziel des Wettbewerbs ist es, ein autonomes Modellauto (Maßstab 1:10) zu entwickeln, welches in der Lage ist aus den Anforderungen des Straßenverkehrs abgeleitete, simplifizierte Aufgaben zu bewältigen [TU Braunschweig]. Der Verlauf des Kurses ist vor dem Wettbewerb nicht bekannt, weshalb sämtliche Fahrentscheidungen nur auf Grundlage der während der Fahrt gesammelten Sensordaten getroffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein System entwickelt, das für die bestehende Fahrzeugplattform des Teams NaN eine dynamische Geschwindigkeitsplanung vornimmt. In dem Wettbewerb geht es nicht nur darum, die in den Kurs eingebetteten Szenarien fehlerfrei zu absolvieren, sondern auch darum, welches Team in der vorgegebenen Zeit die größte Strecke zurücklegt. Daher ist es erstrebenswert in allen Fahrsituationen so schnell wie möglich und so langsam wie nötig zu fahren.

1.1 Der Carolo-Cup

Der Carolo-Cup ist ein jährlich stattfindender Hochschulwettbewerb, der studentischen Teams die Möglichkeit bietet, sich mit der Entwicklung und Umsetzung von autonomen Modellfahrzeugen auseinander zu setzen. Entwickelt werden Fahrzeuge im Maßstab 1:10, die während des Wettbewerbs selbstständig und ohne Eingriff von außen verschiedene Fahraufgaben erfüllen müssen. Die Fahraufgaben sind dabei aus Szenarien des realen Straßenverkehrs abgeleitet. Die Aufgaben reichen von dem reinen Folgen des Straßenverlaufs, über die Beachtung von Streckenelementen (z.B. Zebrastreifen) und Verkehrsregeln (z.B. Überholverbote), bis hin zu der Beurteilung von Kreuzungsszenarien mit anderen Verkehrsteilnehmern und unterschiedlichen Vorfahrtsregelungen. Um studentischen Teams

die Planung und Realisierung eines Fahrzeugs innerhalb eines Semesters zu ermöglichen, sind Fahrbahnmarkierungen, Streckenelemente und andere Verkehrsteilnehmer simpel und kontrastreich dargestellt (vgl. Abb. 1.1). Dies reduziert den Entwicklungsaufwand und die benötigte Rechenleistung der Bildverarbeitung erheblich und sorgt dafür, dass auch kleinere und unerfahrenere Teams an dem Wettbewerb teilnehmen können.



Abb. 1.1: Strecke des Carolo-Cups 2016

Die Teams treten in zwei dynamischen Disziplinen gegeneinander an: Die erste ist eine freie Fahrt inklusive Einparken, die zweite ist ein Hinderniskurs mit verschiedenen Elementen des Straßenverkehrs. Während der freien Fahrt liegt das Augenmerk darauf, einem unbekannten Streckenverlauf zu folgen, wobei jedes Überfahren von Fahrbahnmarkierungen zu einem Punktabzug führt. Zusätzlich befinden sich entlang der Strecke Parklücken, in die das Fahrzeug ein- und wieder ausparken muss. In der zweiten dynamischen Disziplin wird dann das Verhalten des Fahrzeugs in verschiedenen Fahrsituationen geprüft. Dazu gehören: Geschwindigkeitsbegrenzungen, Sperrflächen, Zebrastreifen, Überholverbote, Kreuzungen sowie der Umgang mit anderen Verkehrsteilnehmern. Jeder Fahrfehler resultiert in einem

Punktabzug, der in dem umfangreichen Regelwerk des Wettbewerbs festgelegt ist. Das Team, das bei den wenigsten Fahrfehlern die größte Distanz in einer vorgegebenen Zeit zurückgelegt hat, gewinnt den Wettbewerb.

1.2 Motivation

Die Technische Universität Braunschweig richtet den Carolo-Cup seit 2007 aus. Unter den sechs studentischen Teams, die 2007 gegeneinander angetreten sind, war auch die HAW Hamburg vertreten. Seitdem hat sich jedes Jahr ein Team der HAW Hamburg den wachsenden Anforderungen des Wettbewerbs gestellt. Die Verfügbarkeit immer neuerer Sensorik, Aktorik und immer kleinerer Computer ermöglichte die Entwicklung von immer leistungsfähigeren Fahrzeugen. Das derzeitige Team der HAW Hamburg (Team NaN) besteht im Kern seit 2015 und hat über die Jahre die Hard- und Software der Fahrzeuge weiterentwickelt. Für den Wettbewerb im Februar 2018 kann somit auf den Ergebnissen der Vorjahre aufgebaut werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der bisherige Stand um ein Konzept für die Maximierung der Fahrgeschwindigkeit erweitert. Ziel ist es, unter Berücksichtigung von Randbedingungen annähernd zeitoptimale Trajektorien zu planen. Bisher entwickelte Strategien erwiesen sich als nicht robust genug oder bewirkten keine signifikante Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Deswegen wurde während des letzten Wettbewerbs eine konstante Geschwindigkeit gefahren. Im folgenden Kapitel wird zunächst der grundlegende Aufbau und die Funktionsweise der Fahrzeuge beschrieben. Anschließend werden verschiedene Ansätze untersucht und der erfolgversprechendste ausgearbeitet und implementiert.

2 Vorstellung der Fahrzeugplattform

Das Team NaN verfügt über zwei verschiedene Fahrzeugplattformen. Eine Eigenkonstruktion und eine handelsübliche Modellbauplattform, die um Sensoren und Informationsverarbeitung erweiterte wurde. Während sich das Fahrgestell und die Aktoren der beiden Plattformen unterscheiden, ist die Sensorik sowie die Informationsverarbeitung beider Fahrzeuge identisch. Die folgenden Abschnitte treffen dadurch in vielen Teilen auf beide Fahrzeuge zu. Da die Umsetzung und Tests bis jetzt allerdings ausschließlich auf der erweiterten Modellbauplattform erfolgt sind, wird diese hier vorgestellt (vgl. Abb. 2.1).



Abb. 2.1: Fahrzeugplattform des Teams NaN

2.1 Hardware

Verglichen mit anderen Teilnehmern des Carolo-Cups verfolgt das Team NaN bezüglich der Hardware einen minimalistischen Ansatz. Nur unentbehrliche Komponenten werden verbaut, wodurch das Fahrzeug verhältnismäßig leicht und kompakt ist. Daraus folgt aber auch, dass die Anzahl unterschiedlicher Sensordaten begrenzt ist. Die Funktion und Interaktion der einzelnen Hardwarekomponenten wird in den folgenden Absätzen beschrieben und ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

2.1.1 Sensorik

Die Erfassung von Sensordaten steht am Anfang der Prozesskette. Die Sensordaten bilden die Basis für Fahrentscheidungen, weswegen ihnen eine gehobene Bedeutung zukommt. Gerade in Abwesenheit verschiedener Informationsquellen ist die Qualität der erfassten Daten für den Rest der Prozesskette ausschlaggebend. Die Sensordaten können in Informationen über die Umgebung und in Informationen über die Fahrzeugbewegung unterteilt werden.

Erfassung der Umgebung

Die korrekte Erfassung der Umgebung ist grundlegend und stellt ein notwendiges Kriterium für die Realisierung autonomer mobiler Systeme dar. Sie erfolgt bei dem Fahrzeug über eine Kamera, die nach vorne gerichtet und in einer Höhe von annähernd 30 cm über der Fahrbahn montiert ist. Eingesetzt wird eine Industriekamera mit einer Auflösung von 752×480 Pixeln. Die Aktualisierung der Bildpunkte erfolgt hierbei allerdings nicht zeitgleich (global shutter), sondern kontinuierlich und zeilenweise von oben nach unten (rolling shutter). Somit kann jederzeit auf das Kamerabild zugegriffen werden und es sind mindestens teilweise neue Informationen enthalten. Gleichzeitig ist immer die Aktualisierungslinie zwischen neuem und altem Bild sowie ein Verzerrungseffekt vorhanden. Die resultierenden Bildfehler sind aber aufgrund der hohen Aktualisierungsrate gering und beeinflussen die Bildverarbeitung nicht maßgeblich. Aufgrund der Anbauhöhe und des schräg nach unten geneigten Blickwinkels der Kamera enthält nur die obere Hälfte des

Kamerabilds Informationen über die Umgebung. In der unteren Bildhälfte befindet sich die Front des Autos, weswegen diese abgeschnitten und nicht mit übertragen wird (vgl. Abb. 2.2). Die effektive Kameraauflösung reduziert sich damit auf 752×240 Pixel. Dies erhöht die Aktualisierungsrate der Kamera, die über USB2.0 angeschlossen ist, auf 65 Hz.

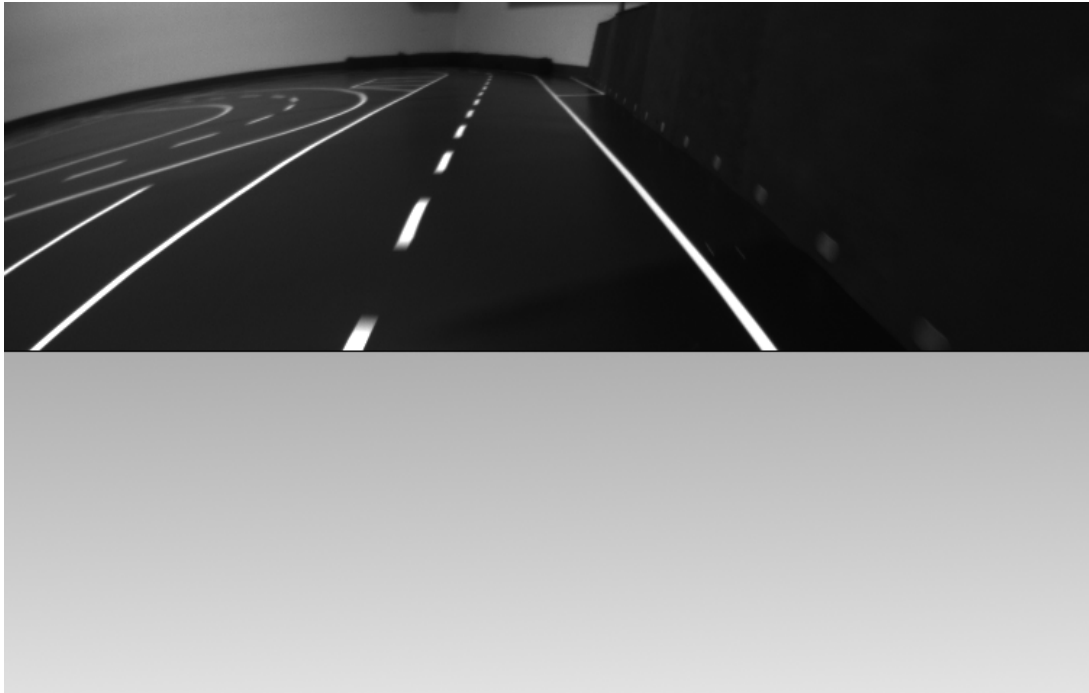


Abb. 2.2: Zugeschnittenes Kamerabild während der Fahrt

Erfassung der Fahrzeugbewegung

Die Erfassung der Fahrzeugbewegung ermöglicht zum einen eine Regelung der Aktoransteuerung, um beispielsweise eine konstante Geschwindigkeit zu halten, und zum anderen die Schätzung der aktuellen Fahrzeugposition (Odometrie). Die geschätzte Fahrzeugposition dient neben der Validierung der Informationen aus den Kamerabildern auch dazu, die relative Position von Objekten zum Fahrzeug zu aktualisieren, auch wenn diese nicht mehr in dem Blickfeld der Kamera liegen. So kann beispielsweise bei einem Überholvorgang entschieden werden, wann der Abstand zu dem passierten Fahrzeug groß genug ist, um wieder auf die rechte Spur zu wechseln.

Die translatorische Fahrzeugbewegung wird über die Erfassung der Motorumdrehungen gemessen, welche durch die Auswertung der im Motor verbauten Hallsensoren bestimmt werden. Die Auflösung der Streckenmessung beträgt ca. 7 mm. Da alle vier Räder angetrieben sind (vgl. Abs. 2.1.3), ist die Detektion von Reifenschlupf an dieser Stelle nicht möglich. Folglich resultiert das Durchdrehen und Blockieren von Reifen in einer fehlerhaften Messung der zurückgelegten Strecke.

Für die Messung der rotatorischen Fahrzeugbewegung wird eine inertielle Messeinheit verwendet. Die Messwerte des Gyroskops und der Beschleunigungssensoren werden integriert und fusioniert [Madgwick, 2010] und so die aktuelle Ausrichtung des Fahrzeugs bestimmt. Die auftretende Drift der Messwerte wird versucht bestmöglich zu kompensieren. Die weitere Optimierung der Sensordaten und deren Verarbeitung ist aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung.

2.1.2 Datenverarbeitung

Unterschiedliche Anforderungen an Reaktionszeit und Schnittstellen haben dazu geführt, dass die Datenverarbeitung auf dem Fahrzeug geteilt durchgeführt wird. Das Auslesen der Sensoren, mit Ausnahme der Kamera, und die Ansteuerung der Aktoren erfolgt mit Hilfe eines Mikrocontrollers. Auch sind an dieser Stelle Sicherheitsfunktionen implementiert, die im Fehlerfall dafür sorgen, dass das Auto anhält. Die aus den Sensordaten ermittelte aktuelle Geschwindigkeit und Position wird an einen Einplatinencomputer übergeben. Dieser Computer ist auch mit der Kamera verbunden und führt die Bildverarbeitung und Trajektorienplanung durch. Die aus der Trajektorie resultierende Soll-Geschwindigkeit und der Soll-Lenkwinkel sowie die zu setzenden Lichtsignale werden dann wieder an den Mikrocontroller übergeben, der daraus die Ansteuerung der Aktorik generiert.

2.1.3 Aktorik

Angetrieben wird das Auto von einem bürstenlosen Elektromotor, der über einen Motorregler angesteuert wird. Die Kraftübertragung erfolgt über ein Zahnradgetriebe, das die Drehzahl reduziert. Dieses Zahnradgetriebe leitet wiederum die Kraft über Zahnriemen an die Differentialgetriebe in Vorder- und Hinterachse weiter. Über die Differentialgetriebe

werden alle vier Räder angetrieben.

Wie der Antriebsstrang stammt auch die Achsschenkelenkung von der Modellbauplattform selbst. Bewegt wird die Lenkmechanik von einem Modellbau-Servomotor, der die in der Software berechneten Lenkwinkel umsetzt.

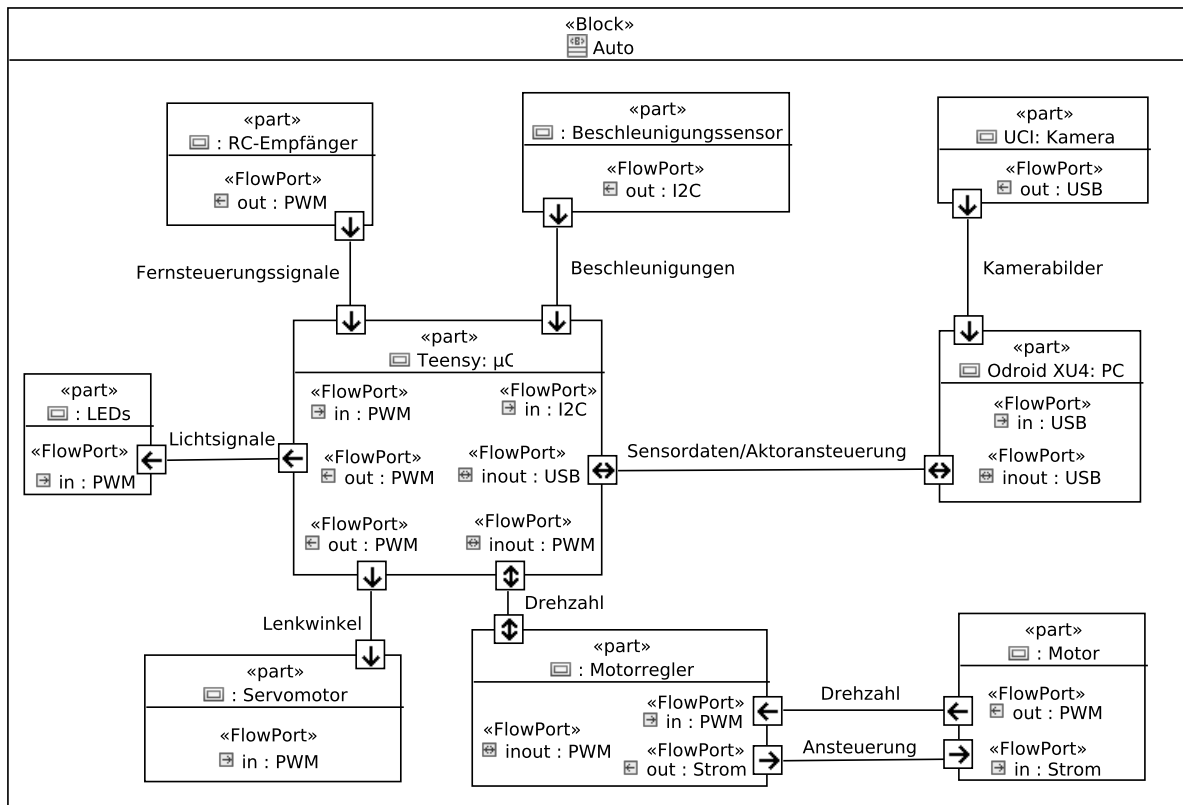


Abb. 2.3: Interaktion der Hardwarekomponenten des Fahrzeugs

2.2 Software

Wie die Hardware, ist auch die Software des Fahrzeugs das Produkt eines mehrjährigen Entwicklungsprozesses. Die grundlegende Softwarearchitektur ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Darstellung bietet eine Orientierung, an welcher Stelle die Trajektorienplanung, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, in die Prozesskette eingepflegt wird. Da die Trajektorienplanung auf den Ergebnissen der vorhergehenden Prozessschritte basiert, werden die

einzelnen Schritte sowie der Informationsfluss in den folgenden Abschnitten beschrieben.

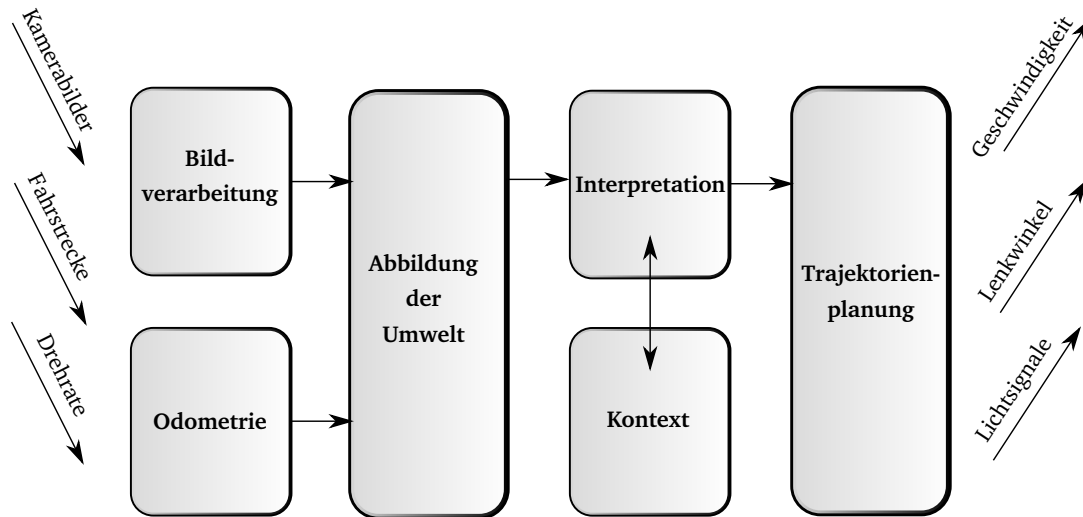


Abb. 2.4: Architektur der Fahrzeugsoftware

2.2.1 Bildverarbeitung

In der Bildverarbeitung wird das aufgenommene Kamerabild nach Fahrbahnelementen durchsucht. Zunächst werden die äußeren Fahrbahnbegrenzungen mit einem dafür entwickelten Liniensuchalgorithmus bestimmt. Die genaue Funktionsweise des Algorithmus ist dabei in der Bachelorarbeit “Echtzeitfähige Startpunktalgorithmen für kamerabasierte Fahrspur-, Kreuzungs- und Hindernisidentifikation” [Drauschke, 2016] beschrieben.

Bevor nach weiteren Elementen gesucht wird, erfolgt zunächst eine Korrektur der Linsenverzeichnung, sowie eine Umwandlung des Bildes in die Draufsicht (vgl. Abb. 2.5) mittels einer Vier-Punkt-Transformation. Durch die Bildtransformation in die Draufsicht wird die perspektivische Verzerrung, die aus der Anbauposition resultiert, entfernt. Es entsteht ein Bild, in dem es leichter möglich ist Längen und Winkel zu messen. Ein Pixel der Draufsicht entspricht einer Fläche von ca. $1,4\text{ cm} \times 1,4\text{ cm}$. Da die genauen Formen und Maße aller auftretenden Objekte in dem Regelwerk des Wettbewerbs definiert sind, kann in dem transformierten Bild gezielt nach diesen gesucht werden. Beispielsweise beträgt die Länge und der Abstand der Mittellinienelemente immer 20 cm ($\pm 5\%$). Diese Information

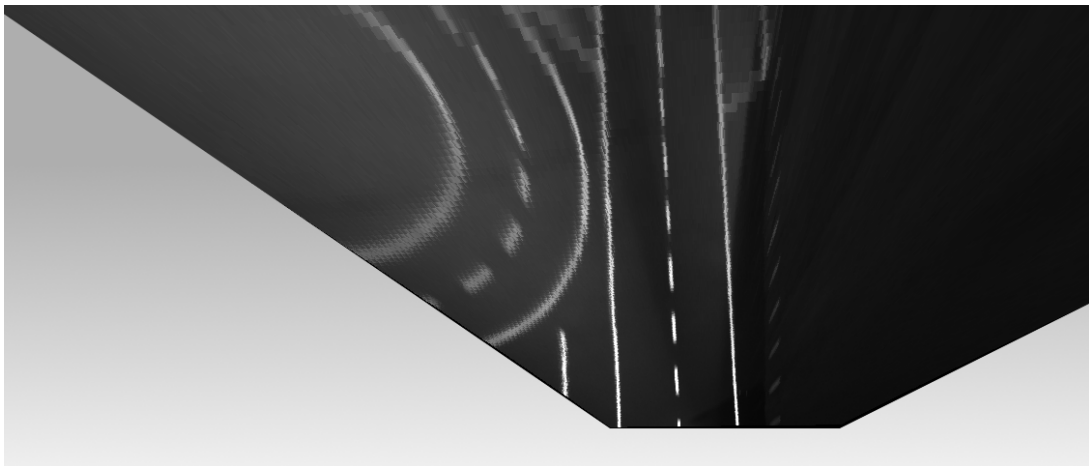


Abb. 2.5: Transformation des Kamerabildes (vgl. Abb. 2.2) in die Draufsicht

wird für die Bestimmung der Mittellinie in dem transformierten Bild genutzt.

Wenn alle drei Fahrbahnlinien (äußere Fahrbahnbegrenzungen und Mittellinie) bestimmt wurden (vgl. Abb. 2.6) und in Form von Punktwolken vorliegen, wird aus diesen Informationen die Fahrbahnbreite und die Fahrbahnmitte ermittelt. Anschließend werden die rechte und linke Fahrspur berechnet und ebenfalls in Form einer Punktwolke als Information über die Umgebung gespeichert. Während die Berechnung der Fahrspur in den meisten Fällen gut funktioniert, gibt es jedoch in unregelmäßigen Abständen Fehlerkennungen. In einzelnen Bildern werden nicht zu der Fahrbahn gehörende Linien fälschlicherweise in der Berechnung berücksichtigt. Das Ergebnis ist dann eine Fahrspur, die nicht der Realität entspricht. Zusätzlich kann es vorkommen, dass weit entfernte Fahrbahnmarkierungen nur in manchen Kamerabildern detektiert werden. Die Folge ist, dass die berechnete Fahrspur in einem Programmzyklus länger ist und in einem folgenden Programmzyklus wieder kürzer. Es kommt also vor, dass weit entfernte Fahrbahnabschnitte nur kurzzeitig detektiert und danach wieder verworfen werden.

Weitere Elemente, wie Kreuzungen, andere Verkehrsteilnehmer, Zebrastreifen oder Abbiegepeile werden ebenfalls in der Draufsicht gesucht. Hier wird die Anordnung der Ecken von unbekanntem Elementen im Kamerabild mit den Formen verglichen, nach denen gesucht wird. Wurden erfolgreich Elemente bestimmt, werden diese mit allen benötigten Informationen, wie beispielsweise Position oder Richtung eines Abbiegepeils, für die spätere Interpretation gespeichert.

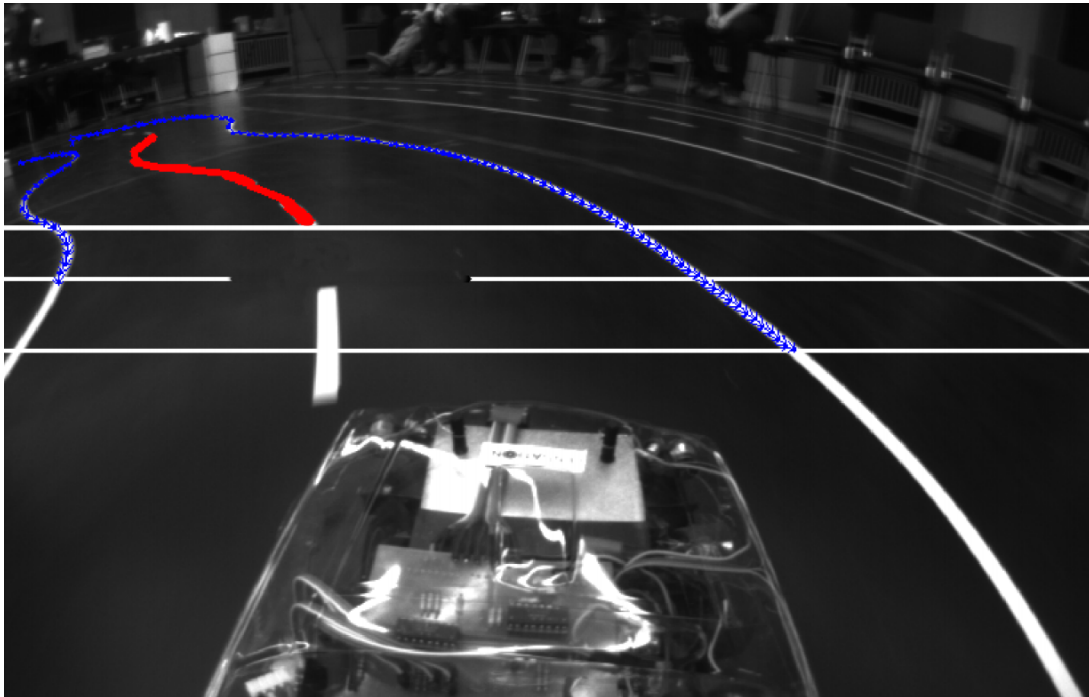


Abb. 2.6: Ergebnis der Liniensuchalgorithmen [Drauschke, 2016]

2.2.2 Abbildung der Umwelt

Für die Abbildung der Umwelt wird aus allen gesammelten und aufbereiteten Daten eine Szene erstellt, welche der Wahrnehmung des Fahrzeugs entspricht. Die Szene bildet dabei die Schnittstelle zwischen Erfassung und Auswertung der Umwelt. Vorhandene Informationen, wie beispielsweise der Streckenverlauf, ein anderer Verkehrsteilnehmer oder eine zukünftige Geschwindigkeitsbegrenzung, sind als Elemente in der Szene angeordnet und für die Verwendung in späteren Prozessschritten aufbereitet.

2.2.3 Interpretation und Kontext

Während in der ersten dynamischen Disziplin – der freien Fahrt ohne jegliche Hindernisse und Streckenelemente – auf die Abbildung der Umwelt direkt die Trajektorienplanung folgt, erfordert die zweite dynamische Disziplin – der Hinderniskurs – die entsprechende Reaktion auf verschiedene Fahrsituationen. Hierzu wird für alle in der Szene vorhandenen Elemente geprüft, ob eine Reaktion jetzt oder zukünftig erforderlich ist. Die vorhandenen

Szenelemente liefern Informationen über die Fahrsituation, in der sich das Fahrzeug gerade befindet. Kombiniert mit den Information aus dem Regelwerk, in welchen Situationen welche weiteren Elemente auftreten können und welche Reaktionen zulässig sind, lässt sich ein Kontext schaffen, der für das Treffen von Fahrentscheidungen notwendig ist. Befindet sich zum Beispiel ein anderes Fahrzeug auf der rechten Fahrspur, muss vor einem Überholmanöver ein mögliches Überholverbot geprüft werden. Sollte jedoch aus dem Kontext bekannt sein, dass sich das Fahrzeug gerade in einem Kreuzungsbereich befindet, ist ein Überholmanöver von vornherein nicht zulässig. Erst sobald der Kreuzungsbereich verlassen und der Kontext dementsprechend aktualisiert wurde, muss die Möglichkeit eines Überholmanövers wieder berücksichtigt werden. Diese Berücksichtigung des Kontextes schafft auch die Möglichkeit die Bildverarbeitung (vgl. Abs. 2.2.1) zu optimieren. Befindet sich das Fahrzeug aktuell nicht in einem verkehrsberuhigten Bereich, sind, laut Regelwerk, keine Zebrastreifen zu erwarten und in den Kamerabildern muss nicht danach gesucht werden.

Hier getroffenen Fahrentscheidungen, beispielsweise das Anhalten an der Stopplinie einer Kreuzung, um einem anderen Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren, werden an die Trajektorienplanung weitergegeben, um von dieser umgesetzt zu werden.

2.2.4 Trajektorienplanung

In diesem Prozessschritt wird entschieden, welcher Weg mit welcher Geschwindigkeit gefahren wird. Während das Fahrzeug beim Carolo-Cup 2017 eine konstante Geschwindigkeit entlang der rechten Fahrspur gefahren ist, werden in dieser Arbeit Möglichkeiten untersucht die bisherige Trajektorienplanung sinnvoll zu erweitern. Das Ziel ist dabei unter Einhaltung sämtlicher Vorgaben eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit zu erreichen und so die Strecke zu vergrößern, die in der vorgegebenen Fahrzeit zurückgelegt wird. In Kapitel 3 werden verschiedene Ansätze die Trajektorienplanung zu optimieren untersucht.

2.2.5 Programmlaufzeit

Der Anwendungsfall des autonomen Autorennens resultiert in gehobenen Anforderungen an die Laufzeit der Steuerungssoftware. Um auch bei hohen Geschwindigkeiten auf eine

veränderte Fahrsituation reagieren zu können, ist es zwingend notwendig die Programm-
laufzeiten aller Systemkomponenten so gering wie möglich zu halten. Unter der Annahme,
dass das Fahrzeug zu jeder Zeit innerhalb von 10 cm Fahrstrecke reagieren können muss,
ergibt sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5 m/s eine maximale Zykluszeit von 20 ms¹.
Die Programmlaufzeit der Bildverarbeitung inklusive der Generierung der Spurinformatio-
nen beträgt Situationsabhängig zwischen 5 und 10 ms. Somit bleiben ca. 10 ms für die
Planung der Trajektorie.

¹Die Fahrstrecke und die Fahrgeschwindigkeit sind vom Team festgelegt bzw. angestrebt.

3 Konzeptentwicklung

Die Thematik mobiler autonomer Systeme ist keineswegs neu, sondern beschäftigt Industrie und Forschung seit vielen Jahren. Schon 1964 präsentierte die Adaptive Machines Group des Labors für angewandte Physik der Johns Hopkins Universität zwei Roboter, die in der Lage waren sich autonom durch die Flure der Universität zu bewegen und sich selbständig an Steckdosen wieder aufzuladen [Watson and Scheidt, 2005].

Es ist nicht verwunderlich, dass über die Zeit eine Bandbreite unterschiedlicher Lösungsansätze für die Problemstellung der Trajektorienplanung autonomer Systeme entwickelt worden ist. Zum einen, weil die Trajektorienplanung einen grundlegenden Aspekt für die Realisierung autonomer Systeme darstellt und zum anderen, weil mit der Entwicklung immer besserer Sensoren und immer kompakterer Rechenleistung die Anzahl der verschiedenen Anwendungsfälle mit eigenen Anforderungen stark gewachsen ist [Karaman and Frazzoli, 2011].

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Ansätze und deren Anwendbarkeit auf die vorliegende Problemstellung geprüft. Als erstes wird die Möglichkeit der Verwendung einer modellprädiktiven Regelung untersucht. Anschließend wird die Generierung von Trajektorien mit Hilfe von rapidly-exploring random trees (RRTs) getestet. Abschließend wird die Möglichkeit der Problemzerlegung in Bahnanalyse und Erzeugung eines Geschwindigkeitsprofils geprüft.

3.1 Modellprädiktive Regelung

Die Grundidee modellprädiktiver Regelung (*model predictive control*, MPC) besteht darin, die Reaktion eines Systems auf beliebige Eingangsgrößen mit Hilfe eines Modells voraussagen zu können. Dies erlaubt die Bestimmung der Eingangsgrößen, die zu den angestrebten

Ausgangsgrößen des Systems führen. Für das Erzielen aussagekräftiger Ergebnisse ist hierbei eine präzise Modellierung des dynamischen Verhaltens des Systems notwendig, was eine der größten Herausforderungen bei der Realisierung einer modellprädiktiven Regelung darstellt [Camacho and Alba, 2013]. Im Gegensatz zu einem PID-Regler wird das Systemmodell nicht nur in der Entwurfs-, sondern auch in der Arbeitsphase – also dem eigentlichen Regelalgorithmus – benötigt. Die zu regelnden Größen des Systems werden bis zu einem Prädiktionshorizont vorausgesagt und mit einer Referenztrajektorie verglichen. Die zukünftigen Stellgrößen werden bestimmt, indem die Differenz zwischen Vorhersage und Referenztrajektorie innerhalb des Prädiktionshorizonts minimiert wird [Dittmar and Pfeiffer, 2004]. Eine der herausragenden Eigenschaften modellprädiktiver Regelungen ist die explizite Berücksichtigung von Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen. Dies bedeutet, dass zu keinem Zeitpunkt Stellgrößen gewählt werden, die das System zu einem späteren Zeitpunkt in einen Zustand versetzen, der unzulässig ist oder Stellgrößen außerhalb der Beschränkungen erforderlich machen würde.

Übertragen auf die Problemstellung der Trajektorienplanung für ein autonomes Modellauto, könnte eine modellprädiktive Regelung dazu eingesetzt werden die Geschwindigkeit des Fahrzeugs entlang der Strecke so zu planen, dass zu keinem Zeitpunkt die fahrdynamischen Beschränkungen des Fahrzeugs überschritten werden. Die Komplexität der Modellierung des dynamischen Verhaltens des Modellautos in den physikalischen Grenzbereichen, ebenso wie der für die kontinuierliche Berechnung des Modells zu erwartende hohe Rechenaufwand, haben dazu geführt, dass dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wurde.

3.2 Zufallsbasierte Planungsansätze

Bei diesem Ansatz wird nicht nur die Geschwindigkeit entlang der detektierten Fahrspur geplant, sondern der abzufahrende Weg gemeinsam mit einem dazu passenden Geschwindigkeitsprofil. Da für Kurven und Überholmanöver Fahrwege geplant werden können, die näher an der Ideallinie liegen, wird das Fahren höherer Geschwindigkeiten ermöglicht.

Das zu lösende Problem ist folgendes: von der aktuellen Position des Fahrzeugs soll zu einem Zielpunkt ein minimal gekrümmter Weg mit einem dazugehörigen Geschwindigkeitsprofil erzeugt werden, der kollisionsfrei und unter Einhaltung der fahrphysikalischen Randbedingungen – wie zum Beispiel maximalem Lenkwinkel oder dem Erhalt der Bo-

denhaftung – abgefahren werden kann.

Bei Fahrzeugen existieren viele voneinander unabhängige Randbedingungen, deren Einhaltung in einem späteren Zustand nur bei einer Berücksichtigung während der Planung des Weges möglich ist. Systeme, bei denen der Zustand (bei einem Auto: Position, Geschwindigkeit, Ausrichtung) von dem Weg abhängig ist, über den dieser Zustand erreicht wurde, werden als nichtholonome Systeme bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist das parallele Einparken eines Autos in eine ausreichend große Parklücke zwischen zwei Autos [LaValle, 2006]. Das Einparken stellt eine zweidimensionale Problemstellung dar und der angestrebte Zustand – Parklücke erreicht – verletzt keine Randbedingungen. Auch wenn eigentlich der direkte Weg in die Parklücke frei ist, ist das Erreichen der Parklücke nur auf wenigen, ganz bestimmten Wegen möglich. Dies ist der Fall, da sich das Auto auf engem Raum nicht frei bewegen kann, sondern nur in die Richtung in die die Hinterräder zeigen. Weil bei der Planung des Weges von nichtholonomen Systemen Randbedingungen eingehalten werden müssen, die von den Systemgrenzen und dem Zielzustand abhängig sind, ergibt sich ein höherer Planungsaufwand als bei holonomen Systemen. Zufallsbasierte Planungsansätze haben sich bei solchen Systemen in der Vergangenheit bewährt [Karaman and Frazzoli, 2011] und haben einflussreiche Fortschritte auf dem Gebiet der Wegplanung erbracht [Iram Noreen and Habib, 2016]. Ein verbreiteter Algorithmus der zufallsbasierten Planung ist der *rapidly exploring random tree*-Algorithmus (RRT). Die Grundidee des RRT ist folgende: von einer Startkonfiguration aus werden kleinschrittig zufällig generierte Konfigurationen aneinandergereiht. Dabei wird eine zufällig generierte Konfiguration verworfen, wenn bei dem Übergang zu dieser eine Randbedingung verletzt wird oder die Konfiguration selbst unzulässig ist. So entsteht ein schnell wachsender Baum, dessen Zweige jeweils Wege darstellen, entlang derer alle Randbedingungen eingehalten werden. Durch das zufällige Generieren neuer Konfigurationen wird der gesamte Zustandsraum abgesucht, wodurch die Wahrscheinlichkeit einen gültigen Weg zu finden, wenn es einen gibt, mit der Zeit gegen eins konvergiert (probabilistische Vollständigkeit) [Iram Noreen and Habib, 2016].

Neue, zufällig generierte Konfigurationen werden an das nächstliegende Element des bereits existierenden Baumes angefügt. Elemente des Baumes, deren Umgebung wenig erkundet ist, haben eine höhere Wahrscheinlichkeit verlängert zu werden. Dies hat zur Folge, dass der Zustandsbaum mit einer höheren Wahrscheinlichkeit in bisher unerkundete Gebiete des Zustandsraums hinein wächst. Eine gleichmäßige Abdeckung des Zustandsraums ist die Folge [LaValle and Kuffner Jr, 2001].

Hat einer der Äste des Baumes die angestrebte Zielkonfiguration erreicht, ist ein Weg gefunden der sämtliche Randbedingungen einhält. Der Algorithmus kann an dieser Stelle entweder abgebrochen werden oder es kann abgewartet werden ob noch weitere Äste die Zielkonfiguration erreichen und somit alternative Wege vorhanden sind, von denen einer ausgesucht wird.

In Abbildung 3.1 ist ein zweidimensionaler rapidly exploring random tree in ansteigenden Wachstumsstadien abgebildet.

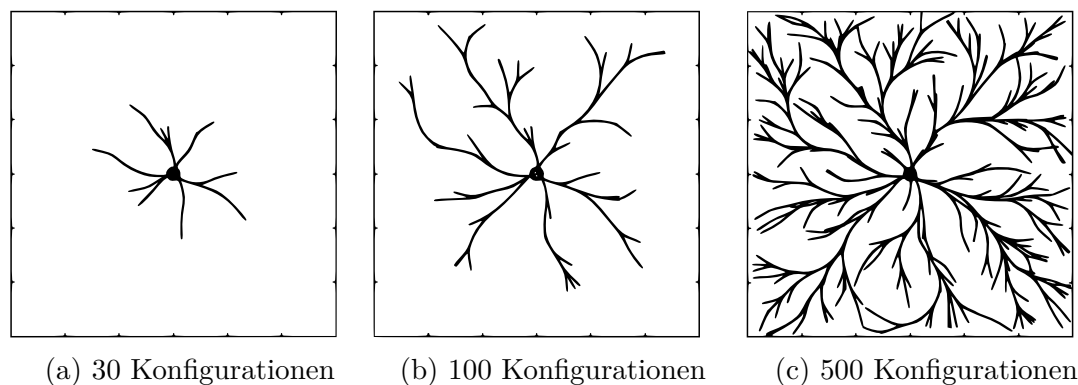


Abb. 3.1: Wachstum eines 2D rapidly exploring random trees [Yang et al., 2014]

Da die Motivation dieser Arbeit aber darin besteht die Fahrgeschwindigkeit zu optimieren, ist eine reine Wegplanung wie in Abbildung 3.1 nicht ausreichend. Dies führte zu der Überlegung den Zustandsraum, in dem der RRT wächst, von den zwei räumlichen Dimensionen $C = \{X, Y\}$ um die Ausrichtung ϕ , den Lenkwinkel θ und die Geschwindigkeit v auf $C = \{X, Y, \phi, \theta, v\}$ zu erweitern. Dieser Ansatz wurde so in der bisherigen Literatur nicht gefunden. Ein Zweig des RRT würde in dem erweiterten Zustandsraum eine Trajektorie darstellen, die durch die Konstruktionsweise des RRTs von dem Fahrzeug auf jeden Fall abgefahren werden kann. Die Prüfung der Randbedingungen bei der Konstruktion ist im Vergleich zu der reinen Wegplanung weit umfangreicher, da jede weitere Dimension neue Informationen hinzufügt und die einzelnen Dimensionen nicht unabhängig voneinander sind. So muss zum Beispiel bei der Geschwindigkeit darauf geachtet werden, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Zuständen von dem Fahrzeug leistbar ist und ebenfalls bei hohen Geschwindigkeiten keine großen Lenkwinkeländerungen mehr zulässig sind.

Auch vergrößert die Erweiterung des Zustandsraums von zwei auf fünf Dimensionen die möglichen Konfigurationen erheblich. Prinzipiell funktionieren RRTs in allen Arten von

Zustandsräumen und eignen sich durchaus für die Planung hochdimensionaler Probleme [Karaman and Frazzoli, 2011], jedoch sind bei der Generierung der zufälligen Konfigurationen Heuristiken nötig, um den Einsatz der RRTs praktikabel zu machen [Akgun and Stilman, 2011].

Es ist also durchaus denkbar mit einem RRT eine Trajektorie zu erzeugen, die eine Fahrt zu einem Zielpunkt entlang der Strecke ermöglicht, während der alle Grenzen des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Während das durchaus schon ein wertvolles Ergebnis ist, hat bisher der Aspekt der Optimalität der Trajektorie keine Beachtung gefunden. Hierfür muss zunächst eine Möglichkeit geschaffen werden unterschiedliche Ergebnisse des RRTs miteinander zu vergleichen, um eine Aussage über die Optimalität der Trajektorie treffen zu können. Dies kann umgesetzt werden, indem Kosten für jeden Zustandsübergang bestimmt werden, die sich aus Trajektorieneigenschaften wie Lenkwinkel- und Geschwindigkeitsänderung zusammensetzen. Die Gesamtkosten der verschiedenen Lösungen können so ermittelt und der Weg mit den geringsten Kosten ausgewählt werden.

Die ausgewählte Trajektorie stellt jetzt zwar die beste gefundene aber noch nicht die bestmögliche Lösung dar und weist noch Merkmale auf, die aus der Zufallsgenerierung resultieren. Diese lassen sich aber in einer Nachbearbeitung, in der zum Beispiel unnötige Lenkbewegungen oder Geschwindigkeitswechsel entfernt werden, reduzieren.

Es ist anzunehmen, dass sich mit RRTs – auf die hier beschriebene Art und Weise – geeignete und auch effiziente Trajektorien erzeugen lassen. Um dies zu erreichen müssen allerdings Heuristiken entwickelt, Beurteilungskriterien bestimmt und eine optimierende Nachbearbeitung der Trajektorien entworfen werden. Zusätzlich muss die Algorithmuslaufzeit soweit reduziert werden, dass eine Online-Berechnung auf dem Fahrzeug möglich wird. Selbst wenn jede – der für sich anspruchsvollen – Teilaufgaben gelöst und in einen RRT-Algorithmus integriert wird, ist es fraglich, ob bei einer fünfdimensionalen Problemstellung eine Laufzeit erreicht wird, die die Anforderungen dieser Aufgabenstellung erfüllt. Akgun and Stilman [2011] haben für die Lösung eines siebendimensionalen Problems mehr als zwei Minuten benötigt, was zumindest ein Indiz dafür ist, dass es schwer ist die Trajektorienplanung über diesen Weg vorzunehmen.

Auch führt die geringe Sichtweite des Fahrzeugs und die Vorgabe die rechte Fahrspur nicht zu verlassen dazu, dass die Idee, neben der Geschwindigkeit auch den Fahrweg zu optimieren, grundsätzlich hinterfragt werden muss. Ist bei der Kurveneinfahrt nicht der restliche Verlauf der Kurve bekannt, ist die Bestimmung einer krümmungsminimalen Bahn durch die Kurve schlicht nicht möglich. Hinzu kommt, dass bei einer Spurbreite von teilweise

nur 35 cm und einer Fahrzeugbreite von 20 cm der Raum für das Einpassen einer Ideallinie begrenzt ist. Zudem wird der Spielraum für Fahrfehler eingeschränkt, da ein Überfahren der inneren oder äußeren Fahrbahnmarkierungen direkt zu einem Punktabzug führt.

Folglich wurde entschieden auf eine Optimierung des Fahrweges zu verzichten und eine Fahrt, mit maximaler Geschwindigkeit, in der Fahrspurmitte anzustreben. Im folgenden Abschnitt wird ein hierfür entwickelter Ansatz vorgestellt, der einzelne Ideen aus den Konzepten in Abschnitt 3.1 und 3.2 aufgreift und eine Online-Berechnung ermöglicht.

3.3 Diskrete Bahnanalyse mit anschließender Geschwindigkeitsplanung

Die Geschwindigkeit entlang der Fahrspurmitte zu maximieren entspricht einer eindimensionalen Problemstellung und lässt sich in zwei Teilprobleme zerlegen: die Analyse der Fahrspur und die Planung der Geschwindigkeit.

Da die Strecke beim Carolo-Cup eben ist und die Fahrbahn überall aus dem gleichen Material besteht, reduzieren sich die für eine Geschwindigkeitsplanung relevanten Informationen über die Strecke auf den Verlauf. Dieser liegt nach der Auswertung der Kamerabilder in Form einer Punktwolke vor (vgl. Abs. 2.2.1) und kann als Ausgangspunkt der Analyse genutzt werden. Änderungen des Streckenverlaufs sind hierbei nicht in Zentimeterschritten zu erwarten, was eine grobe Abtastung zulässt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde empirisch bestimmt, dass für eine Geschwindigkeitsplanung in dem gegebenen Anwendungsfall die Analyse eines 2 m langen Streckenabschnitts an 10 Punkten ausreichend ist. Darüber hinaus ist für eine robuste Auswertung eine Filterung der Spurdaten vorgesehen. Durch diese Filterung reduziert sich der Einfluss von Fehlerkennungen in einzelnen Kamerabildern. Gleichzeitig werden aber weit entfernte Streckenabschnitte berücksichtigt, auch wenn diese nur kurzzeitig in den Kamerabildern detektiert worden sind. Um beide Aspekte zu realisieren wird eine diskretisierte Version des Streckenverlaufs angelegt, in die über mehrere Programmzyklen hinweg die neuen Informationen aus der Bildverarbeitung eingepflegt werden.

Ist der Streckenverlauf bekannt, folgt der Entwurf eines daran angepassten Geschwindigkeitsprofils. Im ersten Schritt ist hier eine Bestimmung der maximalen Geschwindigkeiten entlang des bekannten Streckenverlaufs vorgesehen. Die maximale Geschwindigkeit in den

verschiedenen Streckenabschnitten entspricht hierbei der Geschwindigkeit, bei der die zu erwartenden Querkräfte die maximale Seitenführungskraft der Reifen nicht überschreiten. Um die Modellierung der Fahrdynamik einfach zu halten, wird darauf verzichtet das Fahrverhalten in den physikalischen Grenzbereichen zu beschreiben. Die Komplexität der Trajektorienplanung wird hierdurch stark reduziert. Das Fahrzeug muss jedoch stets unterhalb des Grenzbereichs bleiben, wodurch die geplanten Trajektorien von der zeitoptimalen Trajektorie abweichen.

Nachdem für jeden vor dem Fahrzeug liegenden Streckenabschnitt eine maximal mögliche Geschwindigkeit festgelegt wurde, wird im zweiten Schritt die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs berücksichtigt. Da das Fahrzeug aufgrund der begrenzten Bodenhaftung und Motorleistung nicht beliebig schnell beschleunigt und gebremst werden kann, muss vorausschauend überprüft werden, ob die im ersten Schritt geplanten Geschwindigkeiten erreicht werden können. Wie bei einer modellprädiktiven Regelung muss darauf geachtet werden, dass keine Entscheidungen getroffen werden, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr korrigiert werden können. So darf zum Beispiel nicht der Fall eintreten, dass vor der Einfahrt in eine Kurve nicht rechtzeitig begonnen wird zu bremsen. Um zu überprüfen, ob das Geschwindigkeitsprofil für das Fahrzeug geeignet ist oder ob noch Anpassungen vorgenommen werden müssen, werden die Übergänge zwischen zwei Streckenabschnitten betrachtet, ähnlich wie bei einem RRT. Entlang des bekannten Streckenverlaufs wird zwischen den einzelnen Streckenabschnitten geprüft, ob die jeweilige Geschwindigkeitsdifferenz leistbar ist und gegebenenfalls werden Anpassungen vorgenommen.

Durch die Reduzierung des Planungsumfangs und die starke Diskretisierung der Daten ist dieser Ansatz am ehesten dazu geeignet online eine Geschwindigkeitsplanung durchzuführen. Deshalb wird dieser Ansatz weiterverfolgt und auf seine Eignung hin überprüft. Die Ausarbeitung und Umsetzung des Ansatzes wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4 Analyse des Streckenverlaufs

Die Berechnung der Spurinformatoren aus den Kamerabildern ist in Abschnitt 2.2.1 skizziert worden. Um im nächsten Schritt eine Geschwindigkeitsplanung durchführen zu können, müssen die Spurinformatoren analysiert werden. In dem folgenden Abschnitt wird zunächst die Ausrichtung der Analyse begründet. Anschließend wird die Partikelkette als entwickeltes Analysekonzept sowie Maßnahmen um die Analyse robuster zu gestalten vorgestellt.

4.1 Krümmung der Strecke

Die maximale Geschwindigkeit, mit der sich ein Fahrzeug entlang einer Bahn bewegen kann – ohne von dieser Bahn abzuweichen – ist im wesentlichen von zwei Aspekten abhängig: der Seitenführungskraft der Reifen und der Krümmung der Bahn. Bewegt sich ein Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit v durch eine Kurve mit einer konstanten Krümmung k , so wirkt auf das Fahrzeug die Querbeschleunigung a_{Quer} . Diese Querbeschleunigung resultiert in eine Kraft F_{Quer} ($F_{Quer} = m \cdot a_{Quer}$), welche radial nach außen auf das Fahrzeug wirkt. Diese Kraft wird als Fliehkraft oder als Zentrifugalkraft bezeichnet [Harten, 2012, 71] und stellt einen der wichtigsten Faktoren dar, nach denen auch menschliche Fahrer ihre Geschwindigkeit anpassen [Ritchie et al., 1968]. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die auf das Fahrzeug wirkende Zentrifugalkraft quadratisch an. Der Zusammenhang zwischen der Querbeschleunigung, der Geschwindigkeit und der Krümmung ist in Gleichung 4.1 dargestellt [Harten, 2012, 38]:

$$a_{Quer} = v^2 \cdot k \tag{4.1}$$

Übersteigt die Zentrifugalkraft die maximale Seitenführungskraft der Reifen – also die Zentripetalkraft [Harten, 2012, 70] – bewegt sich das Fahrzeug radial nach außen und verlässt die vorgegebene Bahn. Somit ist die Kenntnis der Bahnkrümmung eine notwendige Voraussetzung für die Bestimmung der maximal fahrbaren Geschwindigkeit. Um die Krümmung der Fahrbahn zu berechnen wurde ein Konzept entwickelt, das im Folgenden *Partikelkette* genannt wird.

4.2 Die Partikelkette

Sobald aus dem Kamerabild eine Spurinformaton generiert wurde, werden für die Berechnung der Krümmung Analysepunkte in einem festen Abstand entlang der Spur platziert (vgl. Abb. 4.1). Bezogen auf ein globales Koordinatensystem haben die Analysepunkte nun eine feste Position, die in späteren Programmiterationen nur durch Fehlerkorrekturen aktualisiert wird. Sinnbildlich verhalten sich die Analysepunkte wie Sandkörner oder Partikel, die vor dem Auto auf die reale Fahrbahn gestreut werden. Fährt das Auto weiter, kommen die Partikel auf das Auto zu, werden dann von dem Auto überfahren und liegen schließlich hinter dem Fahrzeug. Ein Partikel bildet in der Software einen festen Streckenabschnitt ab, dessen Größe von dem Abstand der ausgestreuten Partikel abhängig ist. So dienen die Partikel zum einen als diskrete Analysepunkte, mit deren Hilfe der Rechenaufwand für die Bahnanalyse gesenkt wird und zum anderen zur Assoziation von Informationen zu festen Positionen entlang des Streckenverlaufs. Bewegt sich das Fahrzeug entlang der Strecke, muss die Position der Partikel relativ zum Fahrzeug aktualisiert werden.

4.3 Positionsaktualisierung der Partikel

Jeder Partikel ist einem Streckenabschnitt zugeordnet, seine globale Position entlang der Fahrbahn ist also fixiert. Da sich das Fahrzeug entlang der Fahrbahn fortbewegt, ändert sich im Koordinatensystem des Fahrzeugs die Position der Partikel. Fährt das Fahrzeug 1 m auf einen Partikel zu, muss der Partikel im Koordinatensystem des Fahrzeugs 1 m näher an das Fahrzeug herangezogen werden. Damit also jeder Partikel im Koordinatensystem des Fahrzeugs immer an dem gleichen Streckenabschnitt verbleibt, muss die Position

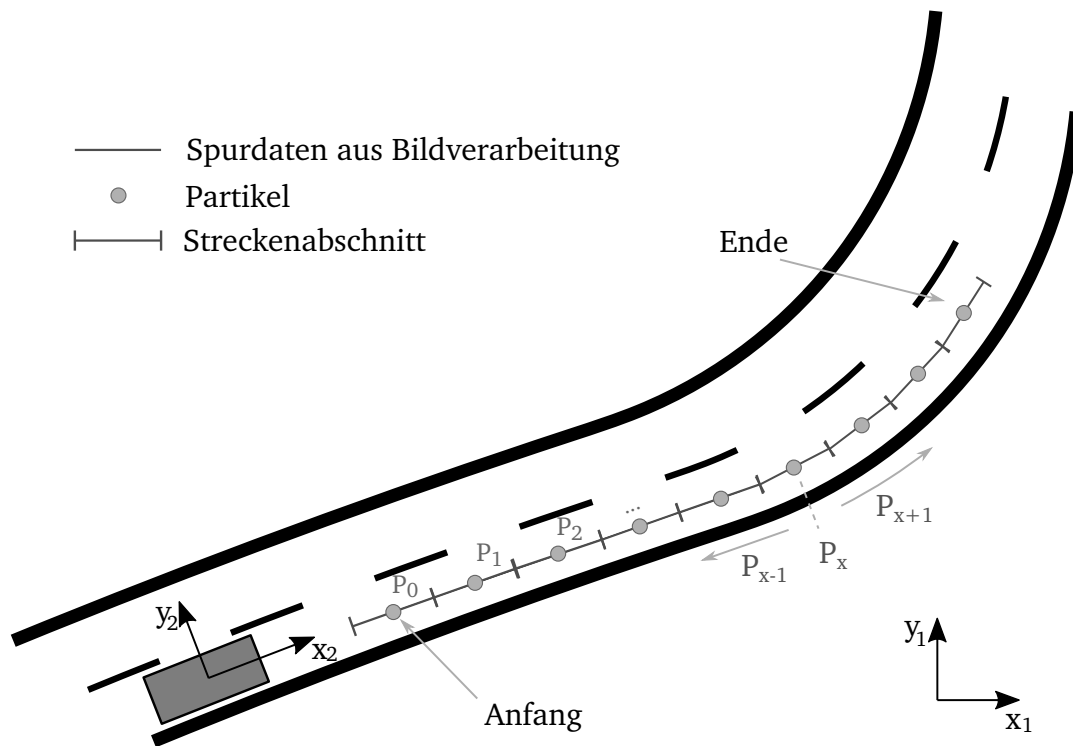


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Partikelkette entlang der Fahrspur

der Partikel so aktualisiert werden, dass die Bewegung des Fahrzeugs ausgeglichen wird. Ermittelt wird die Bewegung des Fahrzeugs über die Umdrehungen der Räder, sowie über die Fahrzeugrotation um die Z-Achse (vgl. Abs. 2.1.1). Die Bewegung wird in jedem Programmzyklus erfasst, in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert und auf jeden Partikel angewendet.

Aufgrund der begrenzten Messgenauigkeit der verwendeten Sensorik, des Schlupfs und der Drift des Gyroskops ist die Erfassung der Fahrzeugbewegung immer fehlerbehaftet. Dies hat zur Folge, dass die Positionsaktualisierung der Partikel ebenfalls fehlerbehaftet ist und sich die Partikel somit nach einiger Zeit von der realen Fahrspur entfernen würden. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, werden die in jedem Programmzyklus aktualisierten Spurinformatoren aus der Bildverarbeitung bei der Positionsaktualisierung der Partikel berücksichtigt. Dazu wird zunächst in einem begrenzten Radius um jeden Partikel herum das nächste Element der aktuellen Spur gesucht. Ist dieses gefunden, wird der Partikel orthogonal zur Fahrtrichtung an die Spur angenähert. Da die Partikel in jedem Programmzyklus nur an die aktuellen Spurdaten angenähert werden und diese nicht

einfach übernommen werden, entsteht eine Trägheit, die den Einfluss einzelner fehlerhafter Spurinformatoren aus der Bildverarbeitung reduziert.

Um den Diskretisierungsabstand konstant zu halten, wird nach der Aktualisierung der Partikelpositionen der Abstand zwischen den Partikel überprüft und gegebenenfalls der definierte Partikelabstand wieder hergestellt.

Die zyklische Anpassung der Partikelpositionen besteht also aus drei Schritten (vgl. Alg. 1). Zunächst werden die Partikel so verschoben, dass die Fahrzeugbewegung ausgeglichen wird. Danach werden die verschobenen Partikel an die aktuellen Spurdaten aus der Bilderverarbeitung angenähert. Abschließend wird der festgelegte Abstand zwischen den Partikeln wieder hergestellt. Ist die Position aller Partikel aktualisiert worden, wird die Krümmung der einzelnen Streckenabschnitte berechnet.

Algorithm 1 particle position update

- 1: **for** every particle **do**
 - 2: *consider vehicle movement*
 - 3: *converge to detected lane*
 - 4: *restore spacing*
-

4.4 Berechnung der Krümmung

Die Krümmung k des Streckenabschnitts, der durch den Partikel P_x repräsentiert wird, lässt sich aus den relativen Positionsinformationen zu dem vorausgehenden Partikel P_{x-1} und zu dem nachfolgenden Partikel P_{x+1} (vgl. Abb. 4.2a) berechnen. Die drei Partikel bilden ein Dreieck (vgl. Abb. 4.2b), dessen Umkreis vollständig bestimmt ist. Die Krümmung entspricht dem Kehrwert des Radius r , welcher sich mit dem Sinussatz berechnen lässt (vgl. Gl. 4.2) [Merziger et al., 2013, 18]. Hierfür wird ein Innenwinkel des Dreiecks und die Länge der gegenüberliegenden Seite benötigt. Der benötigte Innenwinkel β entspricht $\frac{\alpha}{2}$ und die benötigte Seitenlänge entspricht dem Abstand der Partikel s .

$$k = \frac{1}{r} \quad \text{mit} \quad r = \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{\sin(\beta)} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{\alpha}{2} \quad (4.2)$$

Vor der Auswertung der berechneten Krümmungswerte werden diese zunächst aufbereitet, um den Einfluss externer und interner Fehlerfaktoren zu verringern.

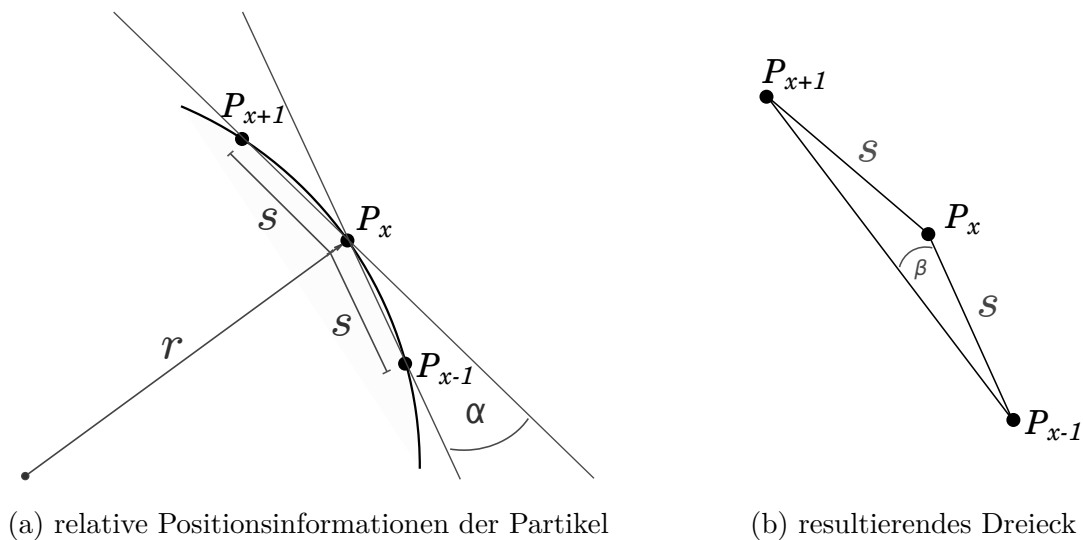


Abb. 4.2: Benötigte Informationen zur Berechnung der Krümmung

4.5 Aufbereitung der Krümmungsdaten

In der Praxis ist die Berechnung der Krümmung äußeren Faktoren ausgesetzt, welche die Genauigkeit der Berechnung reduzieren. Je schneller das Fahrzeug fährt zum Beispiel, desto mehr Vibrationen ist die Kamera ausgesetzt, was die Qualität der Kamerabilder senkt und somit die Bildverarbeitung erschwert. Die Schwarz-Weiß-Übergänge der Fahrbahnmarkierungen werden weicher, was einen Einfluss auf die Berechnung der Spurinformatoren und somit letztlich auch auf die Position der Partikel hat.

Auch die Positionsaktualisierung der Partikel aufgrund der Fahrzeugbewegung und das anschließende Wiederherstellen der Partikelabstände (vgl. Alg. 1) sind fehlerbehaftet und führen zu einer geringeren Genauigkeit der berechneten Krümmung.

Die Auswirkung dieser Einflüsse auf die Position der Partikel in Pixeln ist aber relativ gering. Problematisch ist jedoch, dass durch die geringe Auflösung der Kamera die Position der Partikel im globalen Koordinatensystem fehlerbehaftet ist. Ein Pixel im Kamerabild entspricht ca. 1,4 cm auf der Fahrbahn. Dies führt dazu, dass in ungünstigen Fällen eine kleine Verschiebung in Pixeln eine große Änderung der berechneten Krümmung verursacht. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, werden die berechneten Krümmungswerte gemittelt. Durch die Aufsummierung von Krümmungswerten wird anschließend eine zusätzliche Information generiert, die eine robuste Unterscheidung zwischen Geraden und Kurven ermöglicht.

4.5.1 Mittelwertbildung

Aufgrund der Verkettung der Partikel lässt sich durch Mittelwertbildung die Auswirkung fehlerhaft platzierter Partikel auf die berechnete Krümmung stark reduzieren. Dies ist möglich, da jede Partikelposition in die Krümmungsberechnung von drei Streckenabschnitten einfließt: Die Krümmung des vorhergehenden, des mittleren und des nachfolgenden Streckenabschnitts. Abbildung 4.3 veranschaulicht diesen Vorgang. Wird der Partikel P_2 nicht exakt auf der Spur platziert, sondern ist in Richtung des Pfeils verschoben, vergrößert sich der Winkel β_{12} . Folglich vergrößert sich auch die berechnete Krümmung des durch Partikel P_2 repräsentierten Streckenabschnitts. Gleichzeitig verkleinert sich aber ebenfalls der Winkel β_{23} was zu einer kleineren Krümmung für P_3 führt. Auch die Krümmung von P_1 verkleinert sich, ist aber aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Grafik nicht dargestellt. Wird nun ein Mittelwert über die drei Partikel gebildet, ergibt sich trotz der fehlerhaften Position von P_2 die korrekte Krümmung.

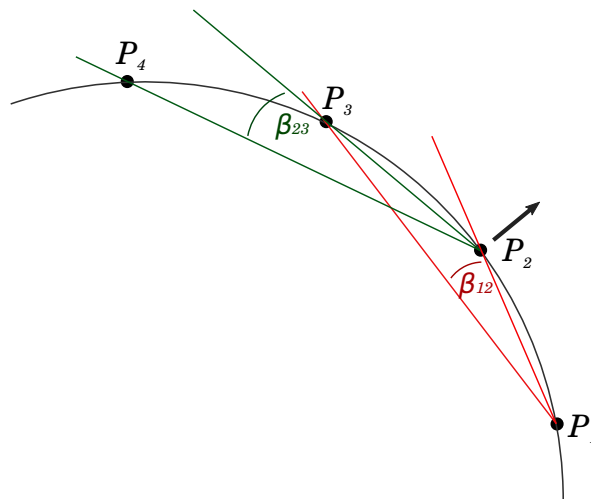


Abb. 4.3: Fehlerhafte Positionierung des Partikels P_2

Bei einer Mittelwertbildung über mindestens drei Partikel ist eine präzise Platzierung der einzelnen Partikel also nicht grundlegend, solange die Partikelkette im Ganzen der Form der Spur folgt. In Tests hat sich eine Mittelwertbildung über fünf Partikel bewährt. In Abbildung 4.5 sind die einzeln berechneten Krümmungen sowie die gemittelten Krümmungen während einer Kurvenfahrt dargestellt.

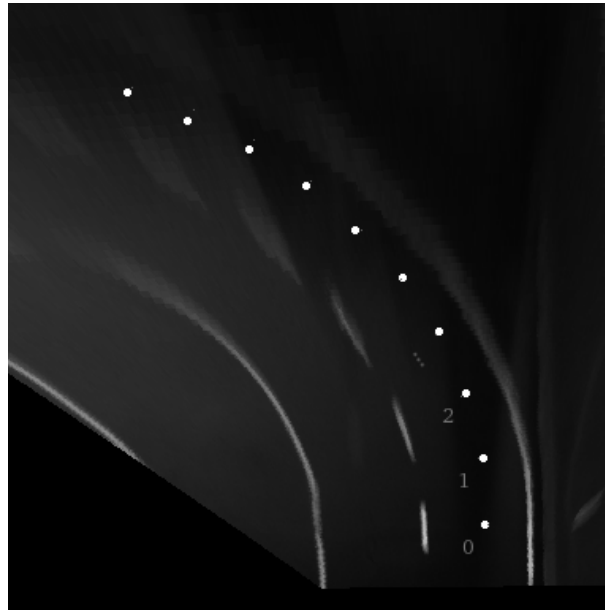


Abb. 4.4: Partikelkette in einer Linkskurve

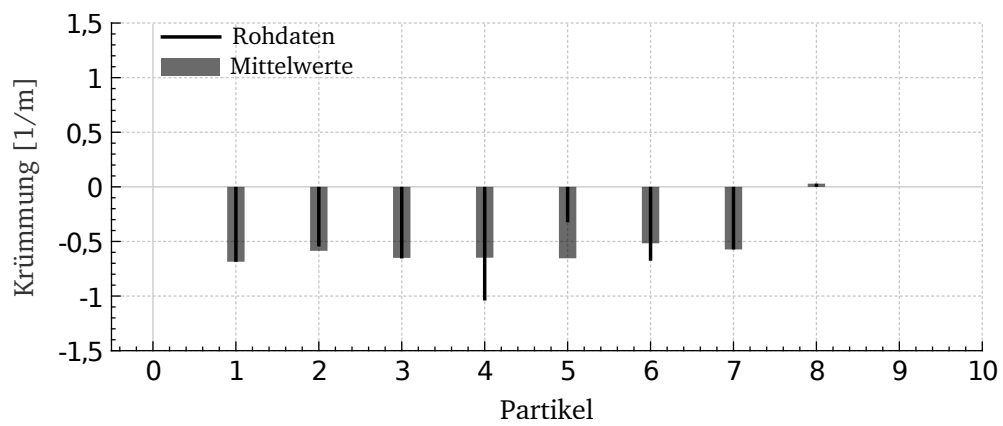


Abb. 4.5: Krümmungswerte der Streckenabschnitte in einer Linkskurve (vgl. Abb. 4.4)

4.5.2 Aufsummierung

Um noch robustere Aussagen über den vor dem Fahrzeug befindlichen Streckenverlauf treffen zu können, werden die bisher ermittelten Krümmungsdaten weiter aufbereitet. Durch die Summe aller vor dem jeweiligen Partikel P_x liegenden Krümmungswerte

$$\sum_{n=0}^x k(P_n)$$

lässt sich eine Aussage darüber treffen ob der Partikel auf einer Geraden oder in einer Kurve liegt. Ist die Summe der Krümmungen unterhalb eines Grenzwertes, ist davon auszugehen, dass sich der jeweilige Streckenabschnitt auf einer Geraden befindet, da sich die Krümmungswerte hier gegenseitig aufheben (vgl. Abb 4.6 und 4.7). Bei einem einzelnen hohen Krümmungswert kann dementsprechend von einem Ausreißer ausgegangen werden, der bei weiteren Berechnungen ignoriert wird.

Daraus resultiert allerdings eine verzögerte Kurvenerkennung, da erst mehrere Partikel höhere Krümmungswerte aufweisen müssen, bevor die aufsummierte Krümmung den Grenzwert übersteigt und die Kurve als solche wahrgenommen wird. Jedoch ist es durch Anpassung des Grenzwertes möglich gewesen einen Kompromiss zwischen Robustheit und Sensibilität zu finden.

Stagniert das Wachstum der Summe über mehrere Streckenabschnitte, bedeutet dies, dass die Strecke nach einer Kurve wieder gerade verläuft. In diesem Fall wird die Summe zurückgesetzt und die entsprechenden Streckenabschnitte werden als Gerade klassifiziert.

Auf Grundlage der jetzt vorliegenden Informationen wird im Folgenden mit der Trajektorienplanung begonnen.

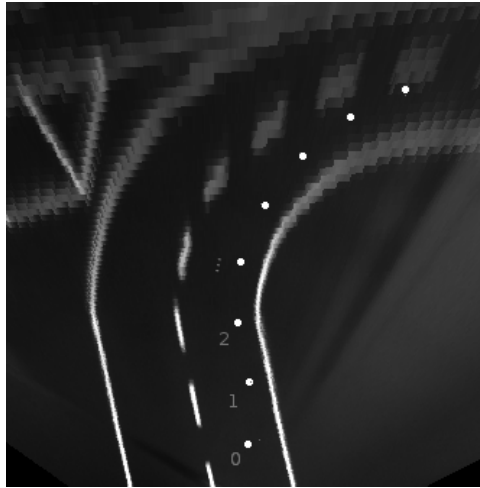


Abb. 4.6: Partikelkette im Übergang zwischen einer Geraden und einer Rechtskurve

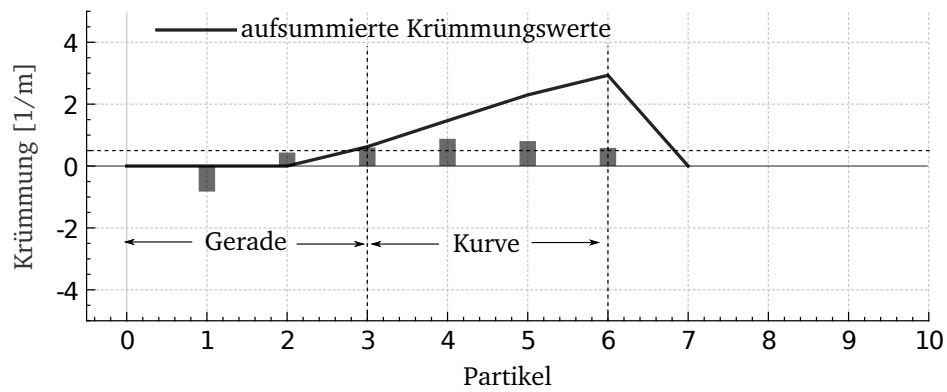


Abb. 4.7: Aufsummierte Krümmungswerte zur Unterscheidung von Gerade und Kurve (vgl. Abb. 4.6)

5 Synthese einer annähernd zeitoptimalen Trajektorie

Die Planung der Trajektorie erfolgt durch die Synthese der Ergebnisse der vorgestellten Bahnanalyse (vgl. Kap. 4) mit physikalischen Grundlagen sowie empirisch ermittelten Grenzwerten der Fahrdynamik. Zunächst erfolgt die Bestimmung der maximal möglichen Geschwindigkeit für die einzelnen Streckenabschnitte entlang der Partikelkette individuell. Im nächsten Schritt wird dann aus den diskreten Geschwindigkeiten, unter Berücksichtigung der fahrdynamischen Eigenschaften des Modellautos, ein Geschwindigkeitsprofil generiert. Das an die Fahrbahn angepasste Geschwindigkeitsprofil bildet eine für das Modellauto abfahrbare Trajektorie, welche der zeitoptimalen Trajektorie angenähert ist.

5.1 Individuelle Abschnittsgeschwindigkeiten

Im ersten Schritt wird die maximal fahrbare Geschwindigkeit für jeden Streckenabschnitt entlang der Partikelkette berechnet. Werden die Streckenabschnitte, wie in dieser Planungsphase, einzeln betrachtet, ist die maximal mögliche Geschwindigkeit in Kurven nur durch die maximale Seitenführungskraft der Reifen begrenzt. Auf geraden Streckenabschnitten wird die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs geplant. Algorithmus 2 gibt einen Überblick über die Planungsabläufe, welche anschließend detaillierter beschrieben werden.

Algorithm 2 calculate maximum speed for route-sections

```

1: for every particle do
2:   if first particle then
3:     do nothing
4:   else if last particle then
5:     plan safe speed
6:   else if particle before stop then
7:     plan safe speed
8:   else
9:     if particle in curve then
10:      calculate maximum speed from curvature
11:    else
12:      set maximum speed to vehicle top speed
13:    if new maximum speed > currently planned speed then
14:      increase planned speed
15:    else if new maximum speed < currently planned speed then
16:      decrease planned speed

```

5.1.1 Maximal mögliche Geschwindigkeit in Kurven

Aufgrund des tiefliegenden Fahrzeugschwerpunkts war in der Vergangenheit ein Umkippen des Fahrzeugs in Kurven kein Problem. Somit bleibt als Randbedingung nur, dass die auf das Fahrzeug wirkende Querkraft F_{Quer} die maximale Seitenführungskraft der Reifen $F_{R,max}$ nicht überschreiten darf.

$$F_{Quer} \leq F_{R,max} \quad (5.1)$$

Da sich die Oberfläche der Fahrbahn entlang der Strecke nicht ändert, wird die maximale Seitenführungskraft der Reifen vereinfacht als konstant angenommen. Die Seitenführungskraft eines Reifens entspricht der Reibkraft quer zur Fahrtrichtung. Diese berechnet sich aus der senkrecht auf den Reifen wirkenden Gewichtskraft F_G , welche aus der Fahrzeugmasse m und der Erdbeschleunigung g resultiert sowie dem Reibkoeffizienten der Materialpaarung von Reifen und Fahrbahn μ .

$$F_{R,max} = F_G \cdot \mu \quad \text{mit} \quad F_G = m \cdot g \quad (5.2)$$

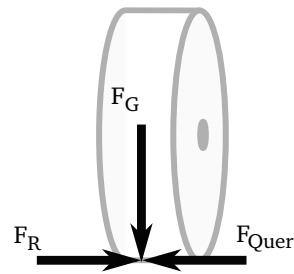


Abb. 5.1: An den Reifen angreifende Kräfte

Die Querkraft entsteht aus der auf die Fahrzeugmasse wirkenden Querbeschleunigung a_{Quer} .

$$F_{Quer} = m \cdot a_{Quer} \quad (5.3)$$

Setzt man Gleichung 5.2 und Gleichung 5.3 in Gleichung 5.1 ein, wird ersichtlich, dass die Fahrzeugmasse für das Kräftegleichgewicht irrelevant ist.

$$m \cdot a_{Quer} \leq m \cdot g \cdot \mu \quad (5.4)$$

$$a_{Quer} \leq g \cdot \mu \quad (5.5)$$

Wie in Gleichung 4.1 beschrieben, ist die Querbeschleunigung von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Krümmung der Strecke abhängig.

$$v^2 \cdot k \leq g \cdot \mu \quad (5.6)$$

Umgestellt nach der Geschwindigkeit ergibt sich:

$$v \leq \sqrt{g \cdot \mu \cdot r} \quad \text{mit} \quad r = \frac{1}{k} \quad (5.7)$$

Die Krümmung k ist aus der Bahnanalyse in Kapitel 4 bekannt, somit verbleibt der Reibkoeffizient μ als einzige Unbekannte in der Gleichung. Da sich der Reibkoeffizient bei Verwendung unterschiedlicher Reifen oder dem Befahren anderer Strecken ändert, ist dieser als Einstellparameter angelegt. Der Parameter kann während der Fahrt angepasst werden, bis die Querkräfte in Kurven der maximalen Seitenführungskraft der Reifen angenähert sind.

5.1.2 Maximal mögliche Geschwindigkeit auf Geraden

Da Querkräfte nur in Kurven – nicht aber auf geraden Streckenabschnitten – auftreten wird die Berechnung der Geschwindigkeit nach Gleichung 5.7 nur in Kurven durchgeführt. Für den Fall, dass sich ein Streckenabschnitt auf einer Geraden befindet, wird die Geschwindigkeit auf einen festen Wert gesetzt. Dieser feste Wert ist nur durch die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs und das Fahrverhalten bei hohen Geschwindigkeiten begrenzt. Um die Geschwindigkeitsplanung an das Fahrzeug anpassen zu können kann der Wert während der Fahrt angepasst werden. Somit sind die maximal möglichen Geschwindigkeiten für Kurven und Geraden festgelegt und die Grenzen für die Trajektorienplanung bestimmt.

5.1.3 Stationäre Grenzen der Trajektorienplanung

Mit dem maximalen Lenkwinkel, der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs und der maximalen Kurvengeschwindigkeit nach Gleichung 5.7 sind die stationären Grenzen definiert, die bei der Trajektorienplanung berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 5.2 sind diese Grenzen visualisiert. Der sich ergebende Raum stellt die zulässigen Kombinationen von Krümmung und Geschwindigkeit entlang einer Trajektorie dar. Die maximale Konstantgeschwindigkeit entspricht dabei der Geschwindigkeit, bei der der maximale Lenkeinschlag ohne Verlust der Bodenhaftung möglich ist. Die berechneten Geschwindigkeiten für die einzelnen Streckenabschnitte liegen – je nach Krümmung – zwischen der maximalen Konstantgeschwindigkeit und der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Ändert sich die berechnete Krümmung für einen Streckenabschnitt, muss die maximal mögliche Geschwindigkeit für diesen Abschnitt aktualisiert werden.

5.1.4 Aktualisierung der Abschnittsgeschwindigkeiten

Für jeden Streckenabschnitt vor dem Fahrzeug wird in jedem Programmzyklus eine maximal mögliche Geschwindigkeit auf Grundlage der Krümmung berechnet. Um die Ergebnisse aus vorhergehenden Programmzyklen mit einzubeziehen und eine Robustheit

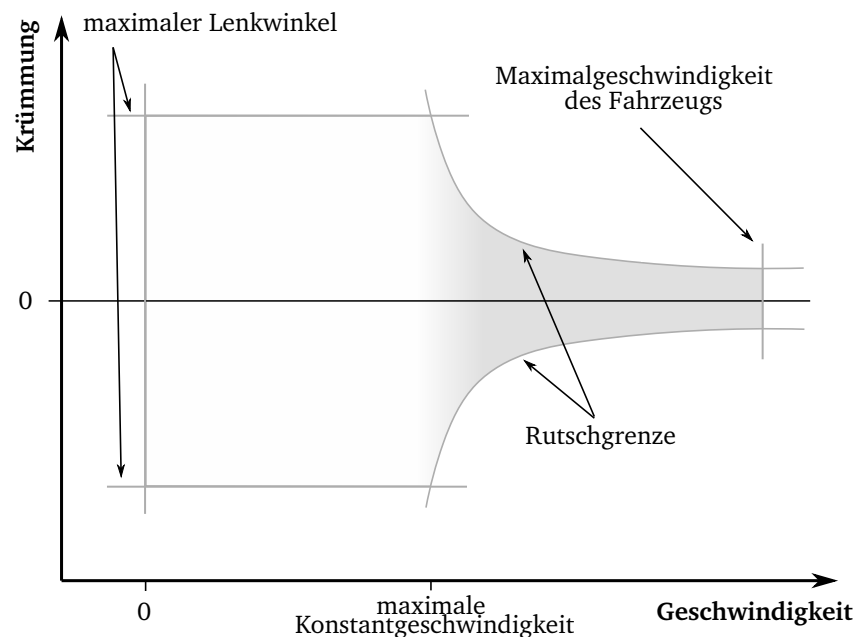


Abb. 5.2: Stationäre Grenzen der Trajektorienplanung nach Spenko et al. [2006]

gegenüber Ausreißern zu erzeugen, wird statt das aktuelle Ergebnis eins-zu-eins zu übernehmen nur die Tendenz des Ergebnisses berücksichtigt. Hat die Berechnung im aktuellen Programmzyklus eine niedrigere Geschwindigkeit ergeben als derzeit für den jeweiligen Streckenabschnitt geplant ist, wird die geplante Geschwindigkeit reduziert. Ergibt die aktuelle Berechnung, dass eine höhere Geschwindigkeit möglich ist als derzeit geplant, wird die Geschwindigkeit angehoben. Somit haben einzelne Berechnungen einen begrenzten Einfluss auf die Geschwindigkeitsplanung und Ausreißer können die durch viele Berechnungen geprägte Planung nicht zerstören.

Einzelne Abschnittsgeschwindigkeiten werden nicht kleinschrittig angepasst, sondern erfordern eine gesonderte Behandlung. Dies gilt zum einen für den ersten und letzten Streckenabschnitt der Partikelkette und zum anderen, wenn das Fahrzeug an einer bestimmten Position anhalten soll.

Erster Streckenabschnitt

Für den ersten Streckenabschnitt der Partikelkette liegt keine Krümmungsinformation vor, da für die Berechnung – wie in Abschnitt 4.4 beschrieben – ein zurückliegender Partikel

benötigt wird. Somit kann zu diesem Zeitpunkt keine maximal mögliche Geschwindigkeit bestimmt werden. Die Planung der Geschwindigkeit für diesen Streckenabschnitt erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt und ist in Abschnitt 5.2.5 beschrieben.

Gezieltes Anhalten

Wird in einem vorausgehenden Prozessschritt entschieden das Fahrzeug anzuhalten (vgl. Abs. 2.2.3), wird der Trajektorienplanung die genaue Position übergeben, an der das Fahrzeug zum Stillstand kommen soll. Hier wird zunächst überprüft, ob sich diese Position bereits innerhalb der Reichweite der Partikelkette befindet. Ist dies nicht der Fall, erfolgt keine Berücksichtigung in der Planung. Sobald sich die Position innerhalb der Reichweite befindet, wird der Streckenabschnitt bestimmt, der unmittelbar vor der Stopposition liegt. Für diesen Streckenabschnitt wird nun eine Geschwindigkeit geplant, die so gering ist, dass ein nahezu sofortiges Anhalten möglich ist. Wird die exakte Stopposition erreicht, ist so ein präzises Anhalten möglich.

Letzter Streckenabschnitt

Zwar gilt auch für den letzten Streckenabschnitt – wie für den ersten – dass sich die Krümmung nicht berechnen lässt, jedoch muss hier bei der Geschwindigkeitsplanung ein anderer Aspekt beachtet werden. Der letzte Streckenabschnitt der Partikelkette entspricht dem Ende der Sichtweite des Fahrzeugs. Es ist möglich, dass sich direkt hinter der Sichtweite eine Situation befindet, die ein schnelles Anhalten oder ein Ausweichen des Fahrzeugs erfordert. Aus diesem Grund wird für den letzten Streckenabschnitt immer eine sichere, langsame Geschwindigkeit geplant, welche eine rechtzeitige Reaktion auf alle auftretenden Fahrsituationen ermöglicht.

5.2 Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik

Nach dem für jeden Streckenabschnitt individuell eine maximal fahrbare Geschwindigkeit bestimmt worden ist, wird hieraus nun ein Geschwindigkeitsprofil erzeugt, welches die

fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeugs berücksichtigt. Hierbei muss primär die maximale Beschleunigung und die maximale Bremsleistung (negative Beschleunigung) des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Konnten bei der individuellen Planung noch beliebige Geschwindigkeitssprünge zwischen zwei Streckenabschnitten entstehen, so wird das Geschwindigkeitsprofil in diesem Schritt so geplant, dass die geplanten Geschwindigkeiten den Geschwindigkeiten realer Trajektorien entsprechen. Da das Ziel die Generierung annähernd zeitoptimaler Trajektorien ist, müssen alle Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit der maximalen positiven beziehungsweise negative Beschleunigung durchgeführt werden. Die Beschleunigung kann somit immer als konstant angenommen werden.

Der einfachste Fall ist hierbei die reine Reduzierung der Geschwindigkeit – zum Beispiel vor dem Anfang einer Kurve. Bremsst ein Auto von einer Geschwindigkeit v_0 mit konstanter Beschleunigung a ergibt sich für die Geschwindigkeit v über dem Weg s [Schnieder and Schnieder, 2013, 266]:

$$v(s) = \sqrt{2 \cdot a \cdot s + v_0^2} \quad (5.8)$$

In Abbildung 5.3 ist die Bremskurve eines Fahrzeugs dargestellt, das sich zu Beginn mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s fortbewegt. Zunächst wird das Fahrzeug mit einer Beschleunigung von -3 m/s^2 gebremst und anschließend mit 3 m/s^2 beschleunigt. Aufgrund

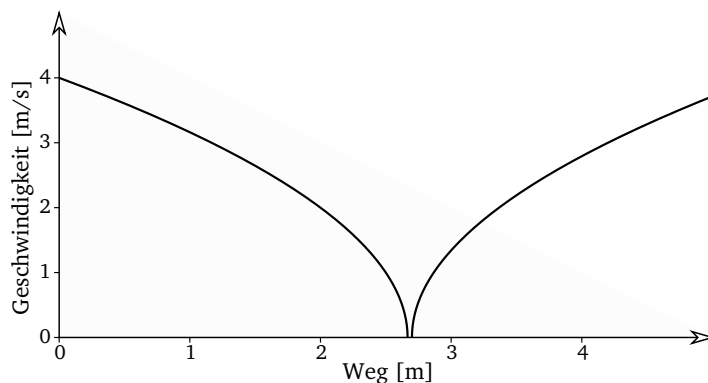


Abb. 5.3: Geschwindigkeits-Weg Diagramm bei konstanter Beschleunigung

der Form wird der Verlauf der Geschwindigkeit während des Bremsvorgangs auch als Bremsparabel bezeichnet. Geht es bei der Geschwindigkeitsplanung nur darum an einer Stelle entlang der Strecke eine bestimmte Geschwindigkeit zu erreichen, kann dies durch Verwendung der Gleichung 5.8 realisiert werden. So werden beispielsweise die Bremsparablen vor Zügen kontinuierlich berechnet. Erreicht das Ende der Parabel einen Bereich in

dem der Zug langsamer fahren oder anhalten muss, wird dies dem Zugführer signalisiert. Dieser kann dann einen Bremsvorgang mit der entsprechenden negativen Beschleunigung beginnen.

Um eine annähernd zeitoptimale Trajektorie zu generieren, ist es jedoch notwendig, an vielen Stellen entlang der Strecke Geschwindigkeiten einzuhalten. Dies erfordert – je nach Fahrsituation – nicht nur die Zerteilung der Bremsparabel in mehrere Abschnitte sondern auch gezieltes Beschleunigen sowie die Ermittlung der Umschaltunkte zwischen Beschleunigen und Bremsen. Abbildung 5.4 zeigt einen Streckenverlauf (oben), der dies veranschaulicht. Das Diagramm (Abb. 5.4 unten) zeigt qualitativ die Geschwindigkeit entlang der darüber abgebildeten Strecke. Die durchgezogene Linie in dem Diagramm entspricht der maximal möglichen Geschwindigkeit auf Grundlage der Krümmung. Die ersten beiden Kurven haben den gleichen Radius. Die maximal mögliche Geschwindigkeit ist somit gleich und geringer als auf der dazwischen liegenden Geraden. Der Radius der

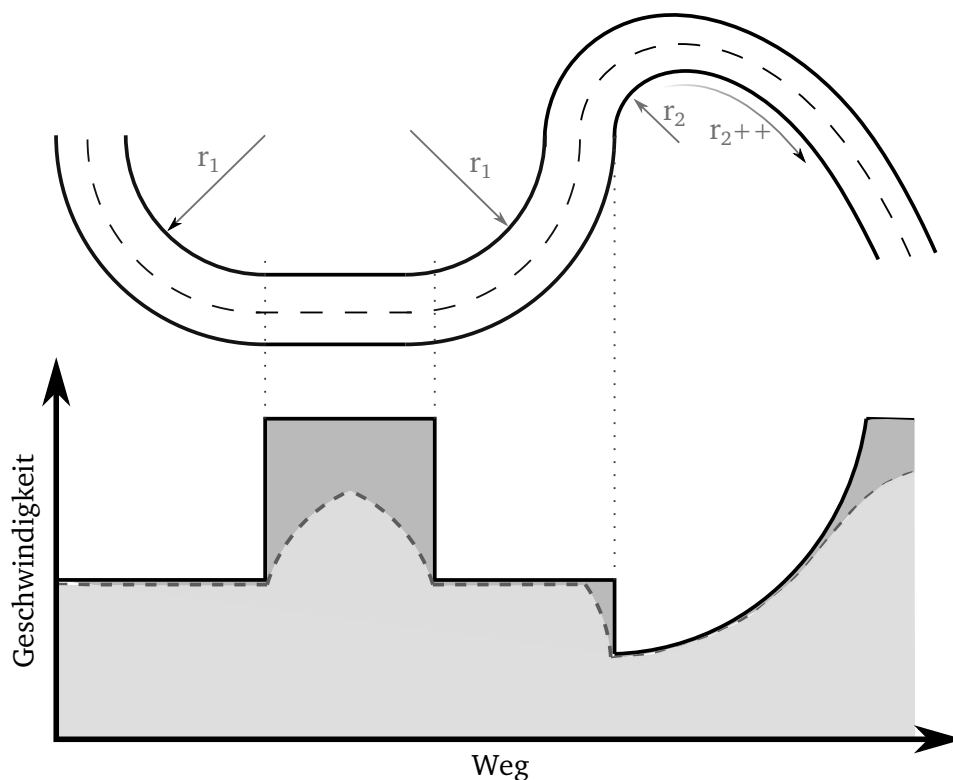


Abb. 5.4: Streckenverlauf mit qualitativem Geschwindigkeitsprofil auf Grundlage der Krümmung sowie unter Berücksichtigung der fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeugs

letzten Kurve wird im Verlauf der Kurve größer, weswegen auch die maximal mögliche Geschwindigkeit steigt. Die gestrichelte Linie entspricht dem Geschwindigkeitsprofil, das unter Berücksichtigung der fahrdynamischen Grenzen und unter Einhaltung der maximal möglichen Geschwindigkeit an jeder Stelle bestmöglich annähert. Ein Geschwindigkeitsprofil das diese Eigenschaften erfüllt wird auch als *maximum velocity curve* (MVC) bezeichnet. Die diskretisierte Abbildung des Streckenverlaufs – die auch schon zur Analyse und zur Planung der individuellen Abschnittsgeschwindigkeiten genutzt wurde – ermöglicht eine Generierung der MVC durch lokale Anpassungen der Abschnittsgeschwindigkeiten. Hierzu wird zuerst die benötigte Beschleunigung zwischen zwei Streckenabschnitten gemessen. Übersteigt die benötigte Beschleunigung die fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeugs, wird die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Abschnitten reduziert.

Um die Berechnung der benötigten Beschleunigung zu vereinfachen werden, zunächst Zeitstempel für die einzelnen Streckenabschnitte berechnet.

5.2.1 Übertragung der Planung in den Zeitbereich

Die Beschleunigung, die zwischen zwei Streckenabschnitten aufgebracht werden muss, wird aus der Zeitdifferenz und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Streckenabschnitten berechnet. Da die Streckenabschnitte bisher nur durch ihre Position entlang der Strecke definiert sind gibt es noch keine Information über die zeitliche Abfolge der Streckenabschnitte.

Um die Zeitdifferenz zwischen zwei Streckenabschnitten berechnen zu können wird für jeden Streckenabschnitt eine erwartete Ankunftszeit berechnet. Diese erwartete Ankunftszeit bildet die Streckenabschnitte im Zeitbereich ab. Somit ist jeder Streckenabschnitt im Ortsbereich (Position entlang der Strecke) und im Zeitbereich (wann wird der Abschnitt erreicht) bestimmt.

Die exakte Berechnung der Ankunftszeit an einem bestimmten Streckenabschnitt ist nur möglich, wenn das exakte Geschwindigkeitsprofil entlang der Strecke bis zu dem jeweiligen Streckenabschnitt bekannt ist. Da das Erreichen des Abschnitts jedoch in der Zukunft liegt, ist das reale Geschwindigkeitsprofil zum Zeitpunkt der Berechnung noch nicht bekannt. Um dennoch eine erwartete Ankunftszeit berechnen zu können, wird zum einen die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und zum anderen das individuell geplante Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abs. 5.1) verwendet. Da dieses Profil nicht die maximalen Beschleunigungen be-

rücksichtigt, resultiert die Verwendung dieses Profils in einem Berechnungsfehler für die erwartete Ankunftszeit und somit letztendlich auch in einem Berechnungsfehler für die Beschleunigung. Dieser Berechnungsfehler wird jedoch iterativ verringert (vgl. Abs. 5.2.4). Der verbleibende Fehler wird mit Hinblick auf die so ermöglichte Online-Berechenbarkeit bewusst in Kauf genommen.

Mit Hilfe der Ankunftszeit ist es möglich die benötigten Beschleunigungen zu berechnen und so die individuell geplanten Abschnittsgeschwindigkeiten an die Fahrdynamik des Fahrzeugs anzupassen.

5.2.2 Addition von Längs- und Querkräften am Reifen

Die Beschleunigung, die ein Fahrzeug aufbringen kann, ist einerseits von der Leistung des Motors und andererseits von der maximal durch die Reifen übertragbaren Kraft abhängig. Da die verwendeten Reifen keinerlei Profil aufweisen, kann vereinfacht von einem isotropen Verhalten ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass die maximale Reibkraft unabhängig von der Richtung ist, in der diese aufgebracht wird. Beschleunigt das Fahrzeug entlang einer Geraden, kann die maximale Reibkraft in Fahrtrichtung aufgebracht werden. Während der Fahrt durch eine Kurve mit konstanter Geschwindigkeit wiederum kann die maximale Reibkraft der Zentrifugalkraft entgegenwirken. Beschleunigt ein Fahrzeug jedoch während einer Kurvenfahrt, treten an den Reifen sowohl Kräfte in Längs- als auch in Querrichtung auf. In diesem Fall muss die Vektorsumme beider Kräfte geringer sein als die maximale Reibkraft der Reifen, um die Bodenhaftung nicht zu verlieren. Der Kamm'sche Kreis (vgl. Abb. 5.5) beschreibt diesen Zusammenhang [Breuer and Rohrbach-Kerl, 2015, 24]. Für die Anpassung des Geschwindigkeitsprofils an die Fahrzeugdynamik bedeutet dies, dass die mögliche Beschleunigung in Fahrtrichtung von der Größe der Querschleunigung abhängig ist.

5.2.3 Anpassung des Geschwindigkeitsprofils

Für jeden Streckenabschnitt liegt jetzt eine geplante Geschwindigkeit und eine erwartete Ankunftszeit vor. Aus der Zeit- und Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei aufeinander

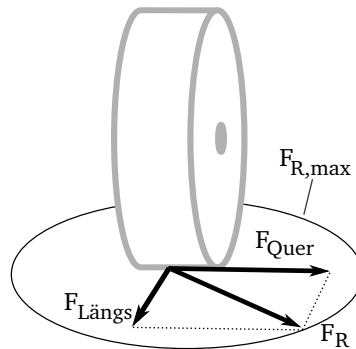


Abb. 5.5: Vektorielle Addition der an einem Reifen angreifenden Längs- u. Querkräfte nach Breuer and Rohrbach-Kerl [2015]

folgenden Abschnitten wird die Beschleunigung a_{12} berechnet, die notwendig ist, um die für den zweiten Abschnitt geplante Geschwindigkeit v_2 zu erreichen:

$$a_{12} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (5.9)$$

Die benötigte Beschleunigung kann nun mit der maximal möglichen Beschleunigung verglichen werden. Übersteigt die benötigte Beschleunigung die mögliche Beschleunigung, muss die Geschwindigkeitsplanung angepasst werden. Die in Abschnitt 5.1 auf Grundlage der maximalen Querb beschleunigung ermittelten Geschwindigkeiten bestehen weiter, sodass nur Reduzierungen der Geschwindigkeiten zulässig sind. Die einzelnen Schritte der Geschwindigkeitsanpassung sind in Algorithmus 3 dargestellt.

Bei dem Vergleich zwischen benötigter und möglicher Beschleunigung werden drei Fälle unterschieden:

1. Die nötige negative Beschleunigung kann nicht aufgebracht werden. Die geplante Geschwindigkeit für den vorhergehenden Streckenabschnitt wird soweit reduziert, bis die verfügbare Bremsbeschleunigung ausreicht. Iterativ wird die gleiche Überprüfung auf den Streckenabschnitt, dessen Geschwindigkeit gerade reduziert wurde, sowie die vorhergehenden Streckenabschnitt angewendet. So erfolgte solange eine sukzessive Verschiebung des Bremspunktes bis die benötigte Bremsbeschleunigung an keiner Stelle der geplanten Trajektorie die maximal mögliche Bremsbeschleunigung übersteigt.

Algorithm 3 adjust speed profile to maximum acceleration and deceleration

```

1: while not allDone do
2:   currentParticle = end of particle chain
3:   allDone = TRUE
4:   while currentParticle != start of particle chain do
5:     calculate required acceleration/decceleration from particle behind
6:     if required decceleration > possible decceleration then
7:       reduce speed of particle behind
8:       recalculate estimated arrival of currentParticle
9:       allDone = FALSE
10:    break
11:    else if required acceleration > possible acceleration then
12:      reduce speed of currentParticle
13:      recalculate estimated arrival of particle ahead
14:      allDone = FALSE
15:    break
16:    else
17:      currentParticle = particle behind

```

2. Kann die nötige positive Beschleunigung nicht aufgebracht werden, so wird die geplante Geschwindigkeit für den nachfolgenden Streckenabschnitt soweit reduziert, bis diese mit der verfügbaren Beschleunigung erreicht werden kann.
3. Die nötige Beschleunigung kann aufgebracht werden. Es ist keine Anpassung der Geschwindigkeitsplanung notwendig.

Die Überprüfungen der benötigten Beschleunigungen und die Anpassungen der Geschwindigkeiten erfolgen schrittweise von dem Ende der Partikelkette bis zu dem direkt vor dem Fahrzeug liegenden Anfang der Partikelkette. Muss die Geschwindigkeitsplanung für einen Streckenabschnitt angepasst werden, beginnt die Überprüfung erneut am Ende der Partikelkette. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis entlang der gesamten Trajektorie keine Anpassung mehr notwendig ist. Werden Anpassungen der Geschwindigkeitsplanung vorgenommen, werden auch die erwarteten Ankunftszeiten der Streckenabschnitte aktualisiert.

5.2.4 Verbesserte Schätzung der erwarteten Ankunftszeit

In der ersten Iteration beruht die Berechnung der erwarteten Ankunftszeit auf dem individuell geplanten Geschwindigkeitsprofil, was wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben zu einer fehlerbehafteten Berechnung der Beschleunigung führt. Während dieses Geschwindigkeitsprofil, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, iterativ optimiert und somit dem realen Geschwindigkeitsprofil angenähert wird, werden nach jeder Anpassung der Geschwindigkeiten auch die erwarteten Ankunftszeiten neu berechnet. Für die Berechnung der benötigten Beschleunigung werden in der folgenden Iteration die neuen Ankunftszeiten verwendet und auf Grundlage dieser wieder Geschwindigkeitsanpassungen vorgenommen. So ergibt sich im Sinne einer Fixpunktiteration eine Annäherung an die realen Ankunftszeiten, wodurch die idealen Bremspunkte angenähert werden.

5.2.5 Sonderfälle bei der Anpassung des Geschwindigkeitsprofils

Für die ersten beiden Streckenabschnitte ist eine gesonderte Anpassung des Geschwindigkeitsprofils notwendig, da zum einen für den ersten Abschnitt keine individuelle Geschwindigkeit berechnet werden konnte und zum anderen die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit berücksichtigt werden muss.

Erster Streckenabschnitt

Da für den ersten Streckenabschnitt wie in Abschnitt 5.1.4 beschrieben keine Krümmung berechnet (vgl. auch Abs. 4.4) und somit keine Geschwindigkeitsplanung vorgenommen werden kann, wird die Geschwindigkeit für den ersten Streckenabschnitt zwischen der Geschwindigkeit des zweiten Streckenabschnitts und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit interpoliert.

Zweiter Streckenabschnitt

Der zweite Streckenabschnitt bzw. Partikel ist der erste, für den eine Krümmung berechnet und somit eine aussagekräftige Geschwindigkeit geplant werden kann. Bei der Berücksich-

tigung der maximalen Beschleunigung kann aber nicht die Differenzgeschwindigkeit zum ersten Streckenabschnitt betrachtet werden, da für diesen keine Geschwindigkeitsplanung existiert (vgl. Abs. 5.1.4). Stattdessen wird in diesem Schritt die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit berücksichtigt. Ergibt die Berechnung der benötigten Beschleunigung, dass die für den zweiten Streckenabschnitt geplante Geschwindigkeit nicht erreicht werden kann, weil das Fahrzeug aktuell zu langsam fährt, wird die geplante Geschwindigkeit für den zweiten Streckenabschnitt reduziert. Der Fall, dass das Fahrzeug zu schnell ist, kann bei Einhaltung der vorhergegangenen Trajektorien nicht auftreten, da bei diesen eine rechtzeitige Reduzierung der Geschwindigkeit geplant worden ist.

6 Ergebnisse

Das in Kapitel 4 und 5 ausgearbeitete Konzept wurde implementiert und in die bestehende Software des Fahrzeugs eingebunden. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse vorgestellt. Hierbei werden zunächst geplante Geschwindigkeitsprofile und die Auswirkung auf die gefahrenen Rundenzeiten dargestellt. Abschließend folgen die Ergebnisse der Laufzeitmessung der Trajektorienplanung.

6.1 Analyse des Streckenverlaufs

Die Analyse des Streckenverlaufs mit Hilfe der Partikelkette (vgl. Abs. 4.2) liefert die Eingangsgrößen für die Planung der Geschwindigkeitsprofile. Die Eingangsgrößen für die Analyse selbst sind die berechneten Fahrspuren. Das Verhalten der Partikelkette bei einzelnen fehlerhaften Berechnungen sowie kurzzeitig detektierten Streckenabschnitten wird in den beiden folgenden Absätzen dargestellt.

6.1.1 Einzelne fehlerhafte Spurberechnungen

Die Abbildung 6.1 zeigt einen geraden Streckenverlauf. Die Berechnung der Fahrspur ist fehlerhaft und entspricht nicht dem realen Streckenverlauf. Da die Berechnungen in den vorausgegangenen Kamerabildern jedoch korrekt waren, bildet die Partikelkette weiterhin die gerade Strecke ab.

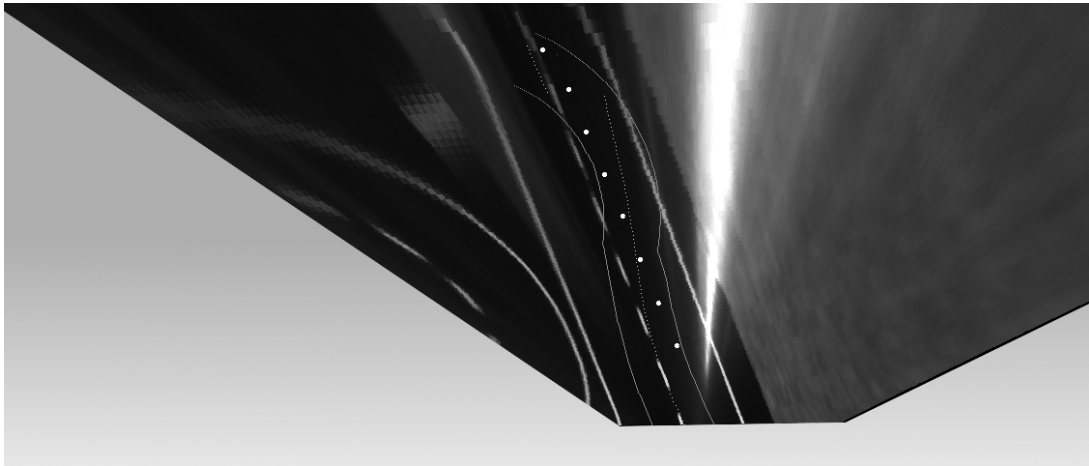


Abb. 6.1: Ausgleich einer fehlerhaften Spurberechnung durch die Partikelkette

6.1.2 Kurzzeitig detektierte Streckenabschnitte

Die Abbildung 6.2 zeigt einen Kurvenausgang, in dem die Fahrspur bis zu dem Ende der Kurve berechnet werden konnte. In dem vorausgegangenen Kamerabild konnte die Fahrspur jedoch bereits deutlich weiter berechnet und somit auch Partikel ausgestreut werden. Auch wenn sich die Partikel nicht mittig auf der Fahrspur befinden, liefert die Streckenanalyse dennoch die Information, dass auf die Kurve eine Gerade folgt, was ein Vorausplanen der Geschwindigkeit ermöglicht.

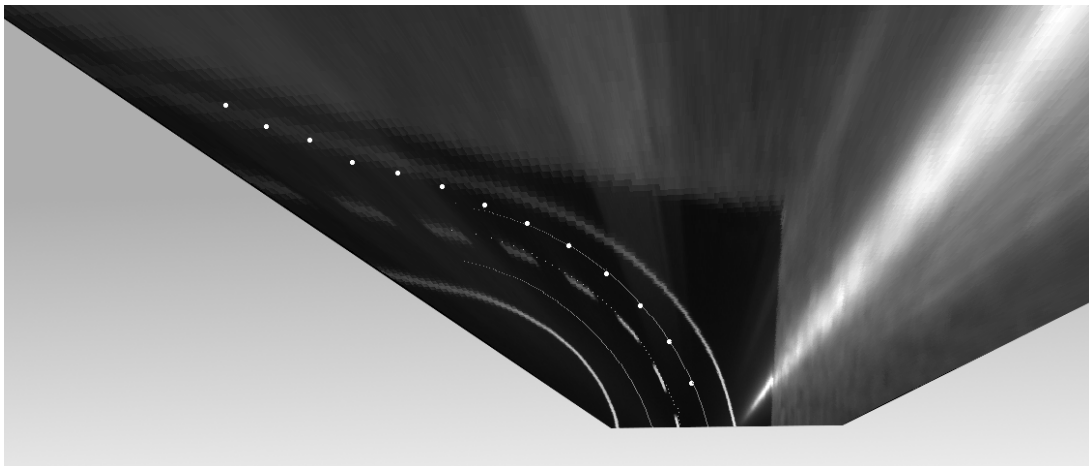


Abb. 6.2: Speicherung nur kurzzeitig detektierter Abschnitte durch die Partikelkette

6.2 Erzeugte Geschwindigkeitsprofile

Die geplanten Geschwindigkeitsprofile stellen die direkten Ergebnisse der entwickelten Algorithmen dar. Da es sehr viele unterschiedliche Fahrsituationen gibt und die Erstellung der Profile von vielen Faktoren abhängig ist, werden in dieser Arbeit nur ausgewählte Situationen vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf häufig vorkommenden Situationen, wie der Planung für die Fahrt entlang einer geraden Strecke, der Kurven Ein- sowie Durchfahrt und dem Verlassen einer Kurve. Zusätzlich wird die Geschwindigkeitsplanung für ein gezieltes Anhalten vorgestellt. Die einzelnen Geschwindigkeitsprofile werden dabei jeweils in zwei Diagrammen abgebildet. Das erste Diagramm zeigt die Geschwindigkeit über der Zeit. Das zweite Diagramm zeigt das in den Ortsbereich übertragene Profil, welches zur direkten Ansteuerung des Fahrzeugs genutzt wird. In beiden Diagrammen sind die Ergebnisse der individuellen Abschnittsgeschwindigkeiten (vgl. Abs. 5.1) mit Säulen und das finale Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abs. 5.2) mit Linien dargestellt.

6.2.1 Gerade

In Abbildung 6.3 ist ein gerader Streckenverlauf (oben) zusammen mit dem generierten Geschwindigkeitsprofil im Zeitbereich (Mitte) und Ortsbereich (unten) dargestellt. Die individuellen Abschnittsgeschwindigkeiten entsprechen der eingegebenen Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Für den letzten Streckenabschnitt wird eine sichere Geschwindigkeit geplant. Um diese zu erreichen wird das Fahrzeug ab dem vierten Streckenabschnitt mit der maximalen negativen Beschleunigung verzögert. Bis zum vierten Streckenabschnitt wird das Fahrzeug maximal beschleunigt.

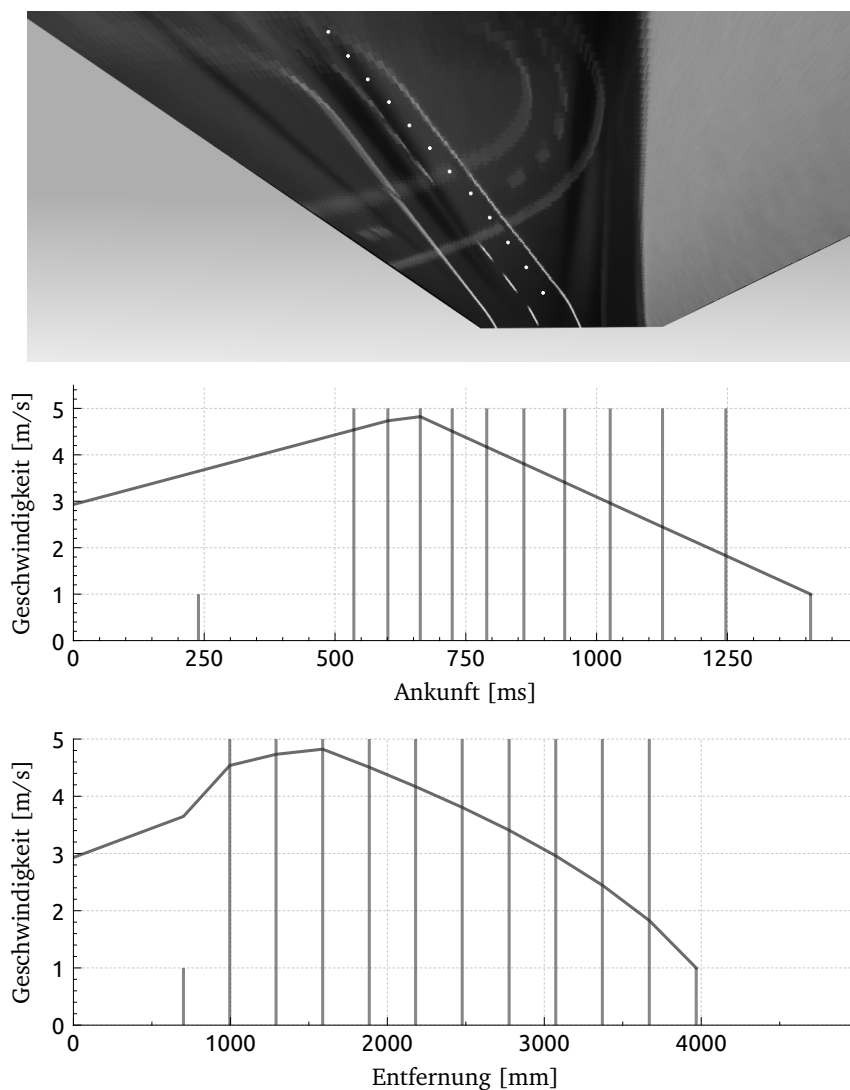


Abb. 6.3: Geschwindigkeitsprofil entlang einer Geraden

6.2.2 Übergang Gerade zu Kurve

In Abbildung 6.4 ist die Planung für den Übergang einer Geraden in eine Kurve dargestellt. Für die geraden Streckenabschnitte wird die Maximalgeschwindigkeit geplant. Für die in der Kurve liegenden Streckenabschnitte wurde auf Grundlage der Krümmung und der Reibungsparameter eine maximal mögliche Geschwindigkeit bestimmt. Um diese zu erreichen wird auf der Geraden nicht auf die maximal mögliche Abschnittsgeschwindigkeit beschleunigt und ab dem zweiten Streckenabschnitt maximal verzögert. Bei dem Erreichen der Kurve wird die dort maximal mögliche Geschwindigkeit eingehalten.

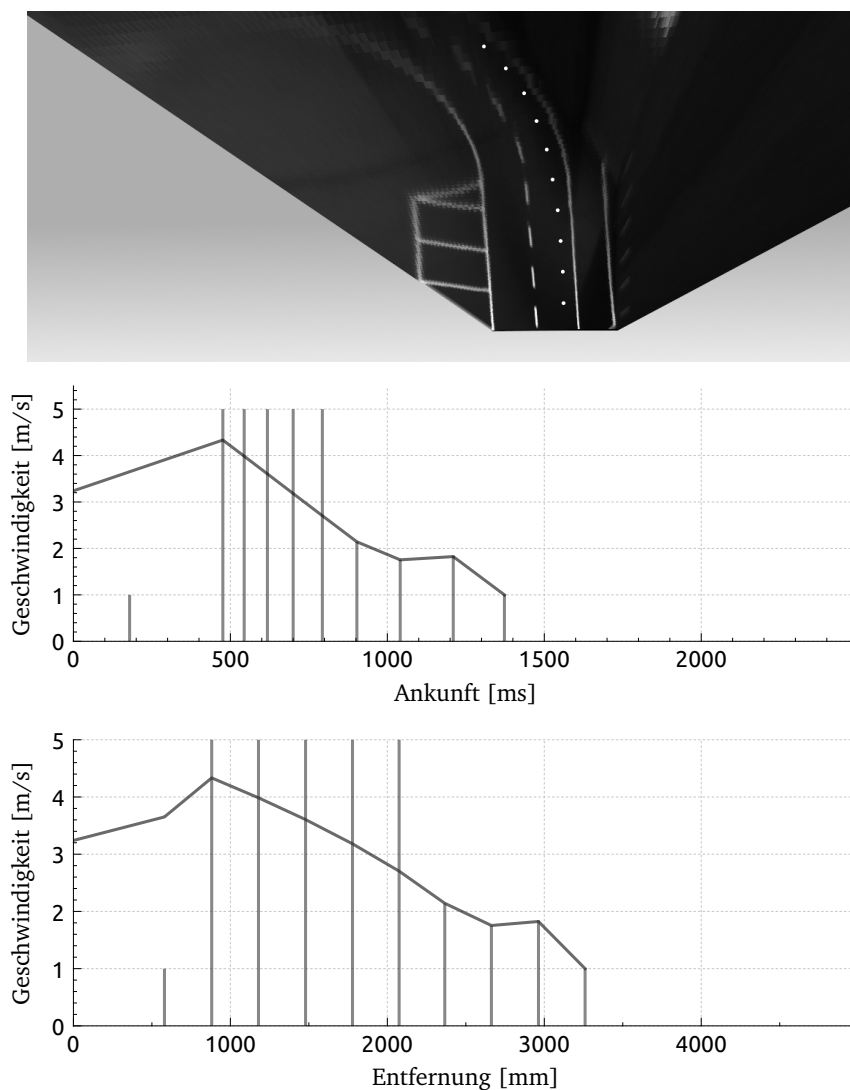


Abb. 6.4: Geschwindigkeitsprofil an dem Übergang von Gerade zu Kurve

6.2.3 Kurve

Das Geschwindigkeitsprofil für die Fahrt durch eine Kurve ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Alle Abschnittsgeschwindigkeiten werden auf Grundlage der Krümmung und Reibungsparameter berechnet und liegen nahe beieinander. In fast allen Abschnitten können – auch unter Berücksichtigung der maximalen Beschleunigung – die als maximal möglich bestimmten Geschwindigkeiten gefahren werden.

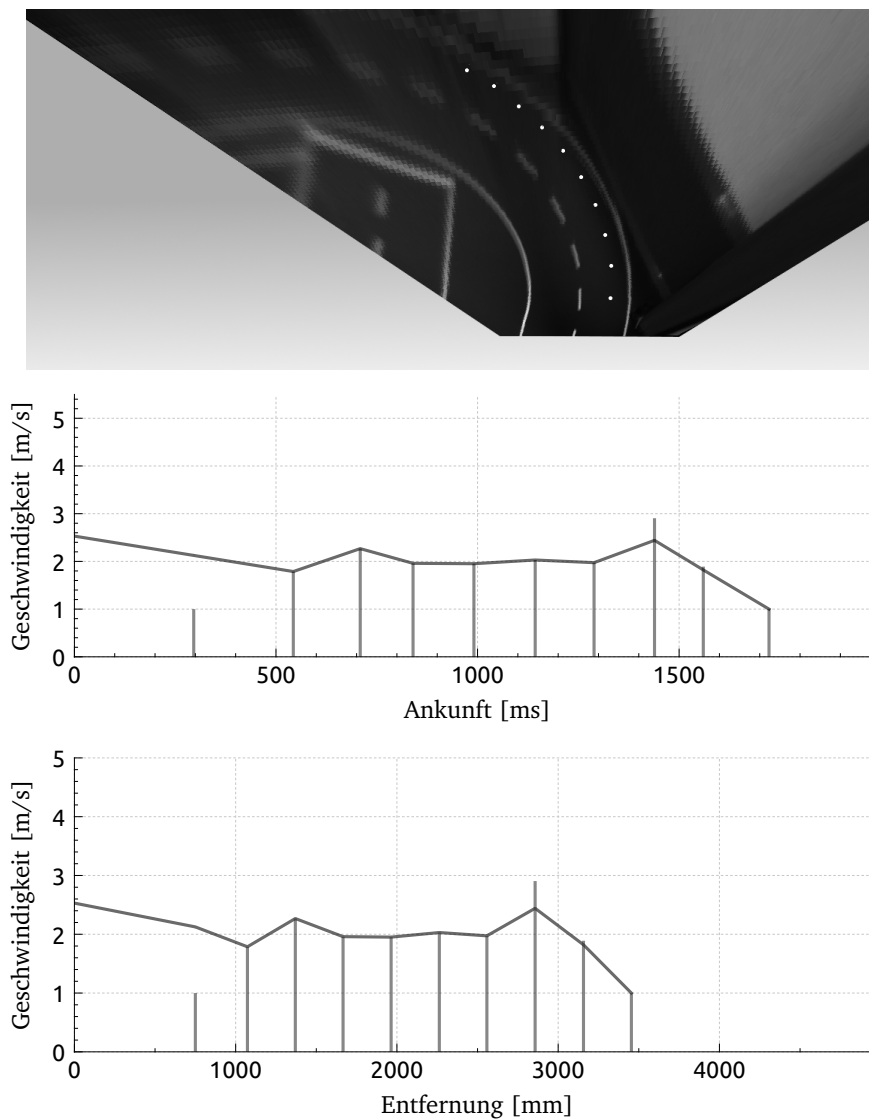


Abb. 6.5: Geschwindigkeitsprofil in einer Linkskurve

6.2.4 Übergang Kurve zu Gerade

Die Abbildung 6.6 zeigt die Geschwindigkeitsplanung für das Verlassen einer Kurve. Solange noch gekrümmte Streckenabschnitte vor dem Fahrzeug liegen, wird die berechnete Geschwindigkeit eingehalten. Ab dem Übergang in die Gerade wird maximal beschleunigt. Die Endgeschwindigkeit wird durch die Vorgabe am Ende der Sichtweite wieder eine sichere Geschwindigkeit erreichen zu müssen, sowie der Höhe maximalen Beschleunigung begrenzt.

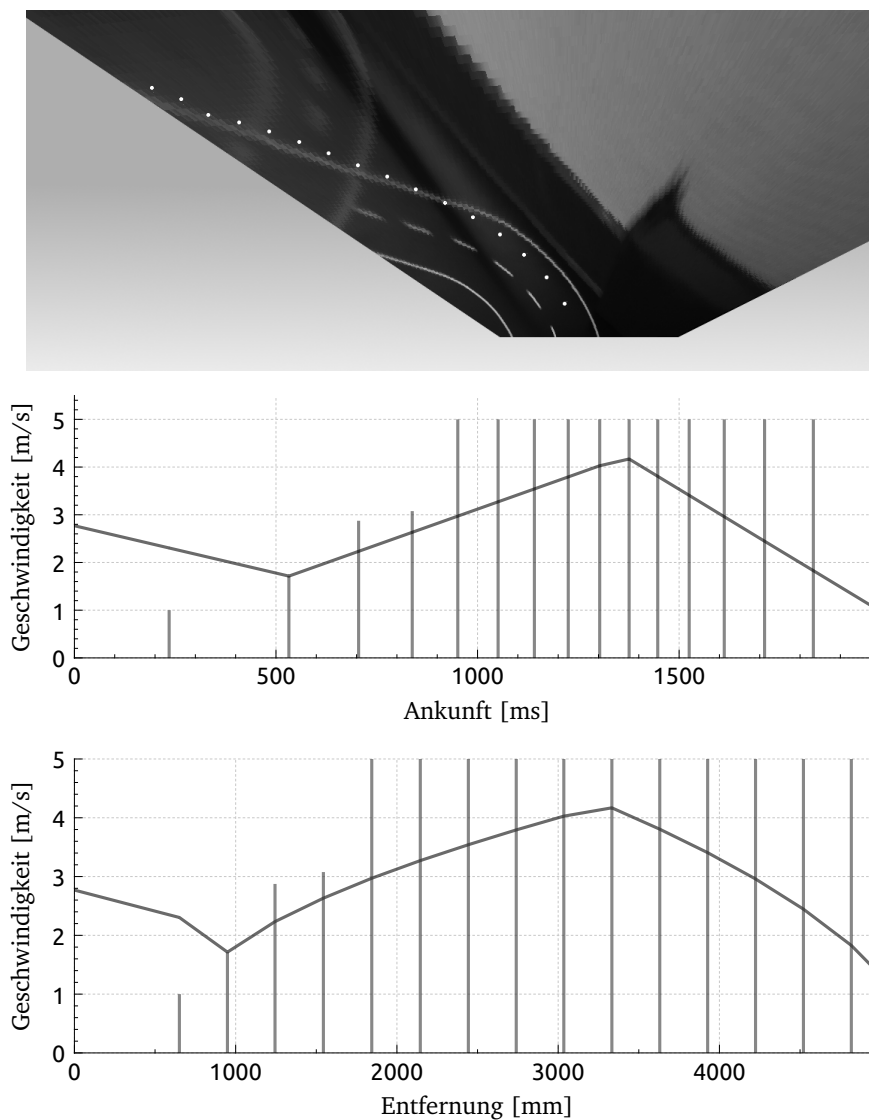


Abb. 6.6: Geschwindigkeitsprofil an dem Übergang von Kurve zu Gerade

6.2.5 Gezieltes Anhalten

Die Geschwindigkeitsplanung für ein gezieltes Anhalten an einer Kreuzung ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Geschwindigkeiten werden so weit gesenkt, dass, bei maximaler negativen Beschleunigung, die vor dem Anhaltepunkt definierte Geschwindigkeit erreicht wird. Anschließend wird maximal beschleunigt. Da die sichere Geschwindigkeit am letzten Streckenabschnitt eingehalten wird, erreicht die Endgeschwindigkeit nicht die maximal mögliche Abschnittsgeschwindigkeit.

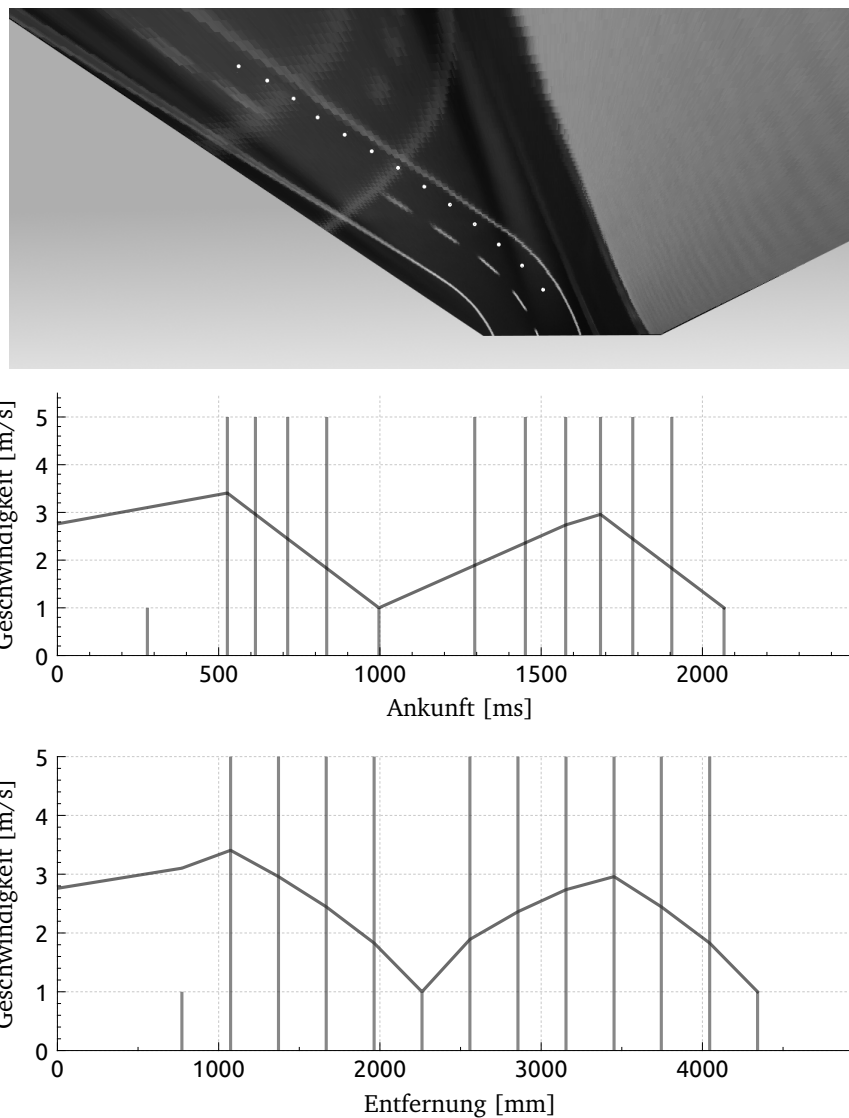


Abb. 6.7: Geschwindigkeitsprofil bei gezieltem Anhalten

6.3 Rundenzeiten

Auf der Teststrecke der HAW Hamburg (vgl. Abb. 6.8) werden Rundenzeiten mit Hilfe von Lichtschranken gemessen. Die Länge der Strecke beträgt ca. 36 m. Da zu dem Zeitpunkt der Zeitmessungen die Hinderniserkennung noch nicht vollständig implementiert war, wurden alle Messungen während Fahrten ohne Hindernisse und andere Streckenelemente vorgenommen. Ohne die in dieser Arbeit entwickelte Trajektorienplanung wurden Rundenzeiten von 14,22 s erreicht. Dies entspricht einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 2,5 m/s. Unter Verwendung der entwickelten Trajektorienplanung wurden Rundenzeiten von 11,84 s gemessen, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 3 m/s entspricht. Die Reduzierung der Rundenzeiten entspricht ca. 16 %.

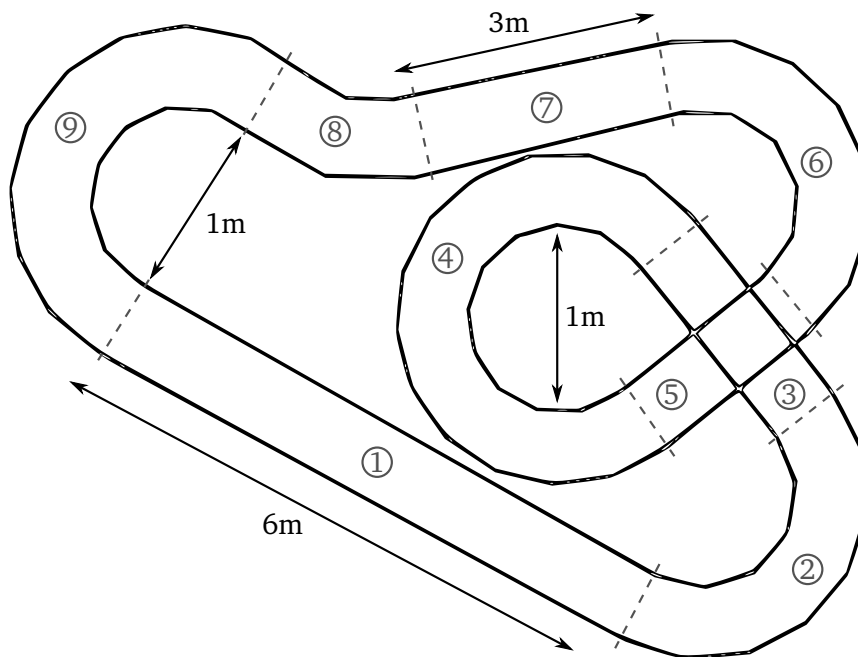


Abb. 6.8: Carolo-Cup Teststrecke der HAW Hamburg

6.4 Geschwindigkeitsprofil für die Teststrecke

Die Abbildung 6.9 zeigt die Geschwindigkeitsplanung anhand einer Karte für die Teststrecke der HAW Hamburg. Dies entspricht zwar derzeit nicht dem Anwendungsfall, gibt jedoch Aufschlüsse über die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit des entwickelten Planungsalgorithmus.

Der obere Graph stellt die Krümmung der in 182 Abschnitte unterteilten Strecke dar. Der mittlere Graph zeigt die Geschwindigkeit über der Zeit und der untere Graph zeigt die Geschwindigkeit über der Strecke.

Bis auf eine, haben alle Kurven der Teststrecke in etwa die gleiche Krümmung (vgl. Abb 6.9 oben). Dementsprechend liegen auch die maximal möglichen Geschwindigkeiten in den Kurven nah beieinander (vgl. Abb 6.9 Mitte und unten). Die Erstellung der Geschwindigkeitsprofile ist mit Parametern erfolgt, die eine negative Beschleunigung zulassen, deren Betrag größer ist als die positive Beschleunigung. Auf geraden Streckenabschnitten wird solange maximal beschleunigt bis entweder die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs erreicht ist oder aufgrund einer Kurve die Geschwindigkeit wieder reduziert werden muss.

6.5 Programmlaufzeit

Die Erfassung der Programmlaufzeiten ist während der in Abschnitt 6.3 aufgeführten Fahrten vorgenommen worden. Bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit betrug die Zeit eines kompletten Programmzyklus ca. 3 ms. Während der Fahrt mit dynamisch geplanter Geschwindigkeit betragen die Zykluszeiten je nach Sichtweite des Fahrzeugs zwischen 4 ms und 10 ms.

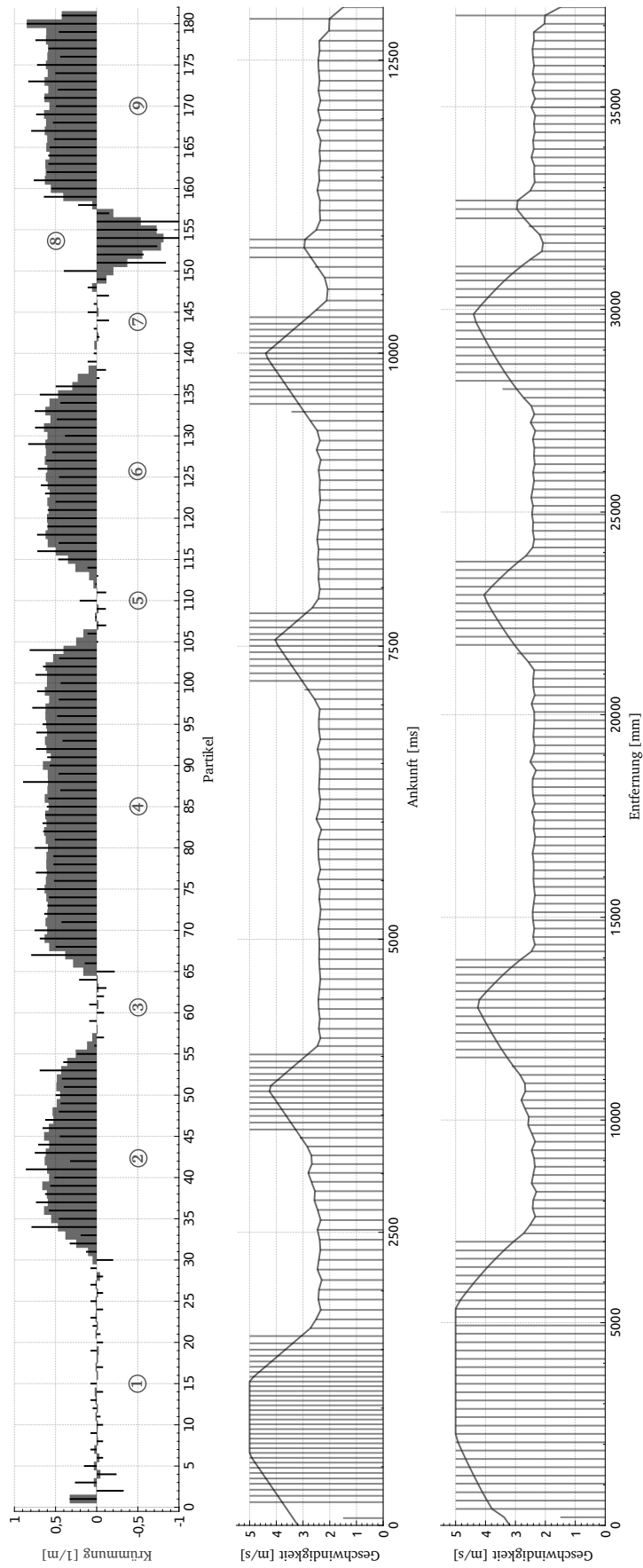


Abb. 6.9: Geschwindigkeitsprofil für die Teststrecke der HAW Hamburg (vgl. Abb 6.8)

7 Bewertung der Ergebnisse

Anschließend an die vorhergegangene Vorstellung der Ergebnisse werden diese hier kritisch diskutiert. Zunächst wird die Analyse des Streckenverlaufs und anschließend die Erzeugung und Qualität der Geschwindigkeitsprofile besprochen. Die Robustheit, die Auswirkungen auf das Fahrverhalten sowie Einstellmöglichkeiten stellen hierbei Aspekte dar, denen für den dauerhaften Einsatz auf dem Fahrzeug eine gehobene Bedeutung zukommt.

7.1 Partikelkette zur Analyse des Streckenverlaufs

Die Analyse der Fahrstrecke durch die von der generierten Fahrspur entkoppelte Partikelkette erweist sich in vielen Bereichen als vorteilhaft. So wurde durch die grobe Diskretisierung der Rechenaufwand für Analyse und Geschwindigkeitsplanung soweit reduziert, dass die in Abschnitt 2.2.5 formulierten Anforderungen an die Berechnungszeiten erfüllt werden. Auch erweist sich die Partikelkette als robust gegenüber einzelnen Fehlern in der Bildverarbeitung. Wurden weit entfernte Streckenabschnitte nur kurz erkannt, werden diese gespeichert bis neue Informationen vorliegen. Auf der anderen Seite bilden sowohl die Partikelkette, als auch die in der Bildverarbeitung generierte Fahrspur denselben Streckenverlauf. Während die derzeitige Lösung funktioniert, scheint es sinnvoller die Bildverarbeitung robuster zu gestalten. Die Partikel könnten dann fest auf der generierten Spur platziert werden, statt dieser nur zu folgen. Die Berechnung und Analyse der Fahrspur wäre so enger verbunden. Zeitweise aus der Positionsaktualisierung der Partikel resultierende Analysefehler würden so verhindert werden. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Spurberechnung während der Entstehung dieser Arbeit ist diese Verbindung mittlerweile denkbar.

7.2 Qualität der Geschwindigkeitsprofile

Die in Abschnitt 6.2 abgebildeten Geschwindigkeitsprofile sind qualitativ sinnvolle Lösungen für die jeweiligen Fahrsituationen. Unter der Voraussetzung, dass die Analyse der Strecke realitätsnahe Ergebnisse liefert, wird auf geraden Streckenabschnitten eine hohe und in Kurven eine der Krümmung angemessene Geschwindigkeit geplant. Vor Kurveneinfahrten wird – in Abhängigkeit der maximalen negativen Beschleunigung und der aktuellen Geschwindigkeit – vorausschauend gebremst und an Kurvenausfahrten wird beschleunigt. Die Geschwindigkeitsprofile im Ortsbereich weisen die in Abschnitt 5.3 dargestellte parabelähnliche Form auf (vgl. Abb. 6.3 und 6.7). Dieses wird über die linearen Zusammenhänge von Beschleunigung, Zeit und Geschwindigkeit in mehreren Iterationen berechnet. Die grobe Diskretisierung entspricht einer Vereinfachung und führt dazu, dass der Verlauf der Geschwindigkeit über dem Ort fehlerbehaftet ist. Als Folge werden längere Wege für das Beschleunigen und Bremsen eingeplant. Dies trägt dazu bei, dass das gesamte Geschwindigkeitsprofil nur annähernd zeitoptimal ist.

Die Geschwindigkeitsplanung für den letzten Streckenabschnitt stellt einen sicherheitsrelevanten Sonderfall dar. So wird von dem Auto immer eingeplant demnächst zu bremsen, sodass am Ende der Sichtweite eine sichere Geschwindigkeit erreicht wird. Da sich jedoch mit einer Fortbewegung des Autos auch das Ende der Sichtweite verschiebt, weicht der Bremspunkt vor dem Auto zurück. Tatsächlich gebremst wird nur dann, wenn eine Situation, die dies erforderlich macht, in das Sichtfeld des Fahrzeugs tritt.

Dieses Verhalten bewirkt zudem, dass bei geringer Sichtweite des Fahrzeugs – auch bei gerader Strecke – alle geplanten Geschwindigkeiten gesenkt werden. Dieses Verhalten ist notwendig, um immer reagieren zu können und wird auch von menschlichen Fahrern in §3 der Straßenverkehrs-Ordnung gefordert.

7.3 Parameterbestimmung für die Geschwindigkeitsplanung

Die entwickelte Geschwindigkeitsplanung kann über die folgenden Parameter an die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs und die aktuellen Umgebungsbedingungen angepasst werden:

- Maximalgeschwindigkeit
- sichere Geschwindigkeit
- maximale positive Beschleunigung in Fahrtrichtung
- maximale negative Beschleunigung in Fahrtrichtung
- maximale Querschleunigung

Diese Parameter definieren die fahrphysikalischen Grenzen für die Planung der Trajektorien. Dennoch erweist sich eine empirische Anpassung der Parameter aufgrund von wechselseitigen Auswirkungen sowie Einflüssen der Bildverarbeitung nicht immer als einfach. Folgende Beispiele sollen dies veranschaulichen: Die Maximalgeschwindigkeit die das Fahrzeug auf einer Gerade fahren kann ist grundsätzlich abhängig von der Leistung des Motors. Hinzu kommt allerdings auch die Qualität und Stetigkeit der berechneten Fahrspur, aus der der Lenkwinkel berechnet wird. Auch kleine Lenkwinkeländerungen führen bei hohen Geschwindigkeiten schnell zu großen Auswirkungen. Der Reibkoeffizient zwischen Reifen und Fahrbahn verändert sich permanent durch Staub auf den Reifen und die Lenkmechanik des Fahrzeugs ist natürlich nicht spielfrei. Sind diese Faktoren bei der Festlegung der Maximalgeschwindigkeit berücksichtigt worden, bedeutet dies allerdings noch nicht, dass diese Geschwindigkeit auf geraden Streckenabschnitten gefahren wird. Die tatsächliche Geschwindigkeit ist zusätzlich von der Sichtweite des Fahrzeugs und der maximalen negativen Beschleunigung abhängig. Reicht also die maximale negative Beschleunigung nicht aus, um innerhalb der Sichtweite die sichere Geschwindigkeit zu erreichen, wird auch auf geraden Streckenabschnitten nicht die festgelegte Maximalgeschwindigkeit gefahren.

Da besonders in Kurven die Sichtweite des Fahrzeugs relativ gering ist, beeinflusst auch hier die maximale negative Beschleunigung die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit maßgeblich. Eine Erhöhung der maximalen Querschleunigung führt nicht zwingend zu einer höheren Kurvengeschwindigkeit.

Es ist vollkommen richtig, dass die gefahrene Geschwindigkeit von der Sichtweite und dem Bremsvermögen des Fahrzeugs abhängig ist. Es ist nur so möglich, jederzeit auf neue Fahrsituationen reagieren zu können. Die Tatsache, dass immer mehrere Faktoren in die Geschwindigkeitsplanung eingehen, gestaltet die Anpassung des Geschwindigkeitsprofils komplexer als die Konfigurationsparameter suggerieren.

7.4 Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit

Mit einer Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit um ca. 0,5 m/s (entspricht ca. 20 %) während der Fahrt auf der Teststrecke der HAW Hamburg ist eine deutliche Verbesserung gegenüber der konstanten Fahrgeschwindigkeit zu erkennen. Übertragen auf die zweiminütige freie Fahrt während des Carolo-Cups erhöht sich die zurückgelegte Strecke um 60 m. Die erzielten Verbesserungen der Rundenzeiten können zu diesem Zeitpunkt jedoch vorerst nur als Indiz für die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems dienen. Zum einen, da sich die optimale Einstellung der Parameter als nicht trivial herausgestellt hat. Die Abhängigkeit von der Bildverarbeitung, der Akkuspannung und die von Staub und Reifen abhängige Bodenhaftung erfordern zusätzliche Erfahrungswerte, um eine weitere Annäherung an die physikalischen Grenzen zu erreichen. Die hierfür notwendigen Messungen und Experimente waren im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht mehr umsetzbar. Zum anderen, da die Teststrecke der HAW Hamburg zu ca. 60 % aus Kurven mit der gleichen Krümmung besteht (vgl. Abb. 6.9). Wird konstant mit der für diese Krümmung maximal möglichen Geschwindigkeit gefahren, werden schon 60 % der Strecke zeitoptimal befahren. Es ist zu erwarten, dass die dynamische Geschwindigkeit auf Strecken mit mehr geraden Streckenabschnitten und verschiedenen Kurvenradien eine größere Verbesserung gegenüber der konstanten Geschwindigkeit bewirkt.

7.5 Begrenzung von Schlupf

Da alle vier Reifen des verwendeten Fahrzeugs angetrieben sind verfälscht jede Form von Schlupf die Distanz- und somit die Geschwindigkeitsmessung (vgl. Abs. 2.1.1). Die Berücksichtigung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die Limitierung der positiven und negativen Beschleunigung in Fahrtrichtung begrenzt die Geschwindigkeitssprünge in der Motoransteuerung. Das Blockieren oder Durchdrehen von Reifen wird verhindert und die Messung der zurückgelegten Distanz ist weiterhin möglich.

8 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine dynamische Trajektorienplanung für ein autonomes Modellauto entwickelt und implementiert. Das entwickelte System wurde in die bestehende Fahrzeugsoftware integriert und kann über Parameter an die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs und die Umgebungsbedingungen angepasst werden. In Testfahrten wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 3 m/s erzielt. Verglichen mit der freien Fahrt im Carolo-Cup 2017 stellt diese Durchschnittsgeschwindigkeit eine Steigerung von ca. 50 % dar. Die Verwendung und Weiterentwicklung des Systems über diese Arbeit hinaus ist zu diesem Zeitpunkt vorgesehen.

8.1 Zusammenfassung

Während der Konzeptentwicklung wurden zunächst die Funktionsweisen und Eigenschaften von zwei bestehenden Planungsansätzen untersucht und deren Anwendbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall geprüft. Es wurde sich sowohl gegen die Verwendung einer modellprädiktiven Regelung als auch gegen den Einsatz von rapidly exploring random trees entschieden. Einzelne Aspekte beider Verfahren wurden jedoch in das anschließend entwickelte Konzept übernommen.

Aufgrund der relativ zur Fahrzeuggröße geringen Spurbreite sowie der häufig geringen Sichtweite des Fahrzeugs wurde die Entscheidung getroffen, kontinuierlich entlang der Fahrspurmitte zu fahren. Die vor dem Fahrzeug liegende Strecke wird in 20 cm große Abschnitte unterteilt und der Streckenverlauf wird kontinuierlich aktualisiert und erweitert. Anhand dieser diskretisierten Abbildung der Strecke wird zunächst die Krümmung der einzelnen Streckenabschnitte berechnet. Anschließend wird auf Grundlage der Krümmung für jeden Streckenabschnitt eine maximal mögliche Geschwindigkeit bestimmt.

Im letzten Schritt wird ein Geschwindigkeitsprofil entlang der Strecke geplant, das die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs berücksichtigt und somit von dem Fahrzeug umgesetzt werden kann.

8.2 Ausblick

Es gibt mehrere Möglichkeiten und Ideen das entwickelte System im Anschluss an diese Arbeit zu erweitern und zu optimieren. Auf der anderen Seite gibt es jedoch auch Aufgaben, die vor der Verwendung der Geschwindigkeitsplanung während des Carolo-Cups 2018 erledigt werden müssen.

Die Geschwindigkeitsplanung wurde bisher nur auf einer der beiden Fahrzeugplattformen des Teams NaN getestet. Die andere Fahrzeugplattform wird voraussichtlich stark abweichende fahrdynamische Eigenschaften aufweisen. Zum einen unterscheiden sich die Fahrgestelle und das Gewicht beider Fahrzeuge, zum anderen wird die zweite Fahrzeugplattform nur über die Hinterachse angetrieben. Sobald die zweite Fahrzeugplattform einsatzfähig ist, müssen die Parameter der Geschwindigkeitsplanung an die Fahrdynamik des neuen Fahrzeugs angepasst werden.

Eine mögliche Optimierung besteht darin, die Entkopplung der Spurbildung und der Spuranalyse aufzuheben. Um dies zu ermöglichen, muss die Spurbildung so weiterentwickelt werden, dass diese robuster wird und auch Streckenverläufe speichert, die nur kurzzeitig detektiert worden sind. Statt der berechneten Spur nur zu folgen, könnte die Partikelkette dann fest auf der Spur platziert werden.

Eine weitere Idee ist die Verbindung der Geschwindigkeitsplanung mit einer Software, die im Rahmen der Bachelorarbeit eines Teammitglieds entwickelt wurde. Das im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte System erzeugt während der Fahrt eine Karte der zurückgelegten Strecke. Die Kombination beider Systeme bietet nach der Vollendung der ersten Runde die Möglichkeit das Geschwindigkeitsprofil für die gesamte Strecke voranzuplanen.

Literaturverzeichnis

- Baris Akgun and Mike Stilman. Sampling heuristics for optimal motion planning in high dimensions. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2640–2645. IEEE, 2011.
- S. Breuer and A. Rohrbach-Kerl. *Fahrzeugdynamik: Mechanik des bewegten Fahrzeugs*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 9783658094751.
- E.F. Camacho and C.B. Alba. *Model Predictive Control*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2013. ISBN 9780857293985.
- R. Dittmar and B.M. Pfeiffer. *Modellbasierte prädiktive Regelung: eine Einführung für Ingenieure*. Oldenbourg, 2004. ISBN 9783486275230.
- Clemens Drauschke. Echtzeitfähige startpunktalgorithmen für kamerabasierte fahrspur-, kreuzungs- und hindernisidentifikation, 2016.
- Ulrich Harten. *Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler (Springer-Lehrbuch) (German Edition)*. Springer, 2012. ISBN 978-3-642-19978-3.
- Amna Khan Iram Noreen and Zulfiqar Habib. Optimal path planning using rrt* based approaches: A survey and future directions. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(ijacsa)*, 7, 2016. doi: 10.14569/IJACSA.2016.071114.
- Sertac Karaman and Emilio Frazzoli. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The international journal of robotics research*, 30(7):846–894, 2011.
- S. M. LaValle. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. Available at <http://planning.cs.uiuc.edu/>.

-
- Steven M LaValle and James J Kuffner Jr. Randomized kinodynamic planning. *The International Journal of Robotics Research*, 20(5):378–400, 2001.
- Sebastian Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, 25, 2010.
- Gerhard Merziger, Günter Mühlbach, Detlef Wille, and Thomas Wirth. *Formeln + Hilfen Höhere Mathematik*. Binomi Verlag, 2013. ISBN 978-3-923923-36-6.
- ML Ritchie, WK McCoy, and WL Welde. A study of the relation between forward velocity and lateral acceleration in curves during normal driving. *Human factors*, 10(3):255, 1968.
- E. Schnieder and L. Schnieder. *Verkehrssicherheit: Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 9783540710332.
- Matthew Spenko, Yoji Kuroda, Steven Dubowsky, and Karl Iagnemma. Hazard avoidance for high-speed mobile robots in rough terrain. *Journal of Field Robotics*, 23(5):311–331, 2006.
- TU Braunschweig. Carolo-Cup. <https://wiki.ifr.ing.tu-bs.de/carolocup/carolo-cup>. Accessed: 2017-08-22.
- David P Watson and David H Scheidt. Autonomous systems. *Johns Hopkins APL technical digest*, 26(4):368–376, 2005.
- Kwangjin Yang, Sangwoo Moon, Seunghoon Yoo, Jaehyeon Kang, Nakju Lett Doh, Hong Bong Kim, and Sanghyun Joo. Spline-based rrt path planner for non-holonomic robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 73(1-4):763, 2014.

Software

Die Implementierung der entwickelten Geschwindigkeitsplanung befindet sich auf der beiliegenden CD.

Dateinamen:

- CParticle.cpp
- CParticle.h
- CParticleChainGenerator.cpp
- CParticleChainGenerator.h

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 15. September 2017

Ort, Datum

Unterschrift