

Entwicklung einer aktiven Sicherheitsumgebung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der technischen Wissenschaften

eingereicht an der
Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz
Institut für Fahrzeugsicherheit

Dipl.-Ing. Nikolai Schretter

Erstbegutachter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan
Zweitbegutachter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Horn

September 2011

Vorwort

Nach Beendigung meines Studiums bekam ich von Prof. Hermann Steffan vom Institut für Fahrzeugsicherheit die Chance, im Bereich der Fahrzeugsicherheit zu arbeiten und mein Wissen in diesem Bereich zu erweitern. Die Arbeit an diesem Institut war von Beginn an überaus interessant und mit sehr hoher Eigenkompetenz verbunden. Unterstützt wurde ich dabei von Dr. Wolfgang Sinz, der für interessante Diskussionen und neue Ideen stets zur Verfügung stand. Durch mein Dissertationsprojekt lernte ich auch Herrn Dr. Hans-Peter Schöner und sein Team kennen, mit dem ich viele Stunden bei Tests in Stuttgart, Meetings und Telefonkonferenzen verbrachte. Durch diese überaus bereichernde Verbindung zur Wirtschaft lernte ich über den so genannten Tellerrand hinauszublicken und mir auch Gedanken hinsichtlich kostengünstiger Realisierbarkeit, Nutzen und Akzeptanz von Produkten und Forschungsprojekten zu machen. Im Zuge des Projektes ergab sich auch wieder der Kontakt mit Prof. Martin Horn, der bereits während meines Studiums ein Diskussions- und Ansprechpartner in allen regelungstechnischen Belangen war und mich auch während der Dissertation unterstützte.

Bei allen genannten Personen möchte ich mich für die Unterstützung während meiner Arbeit recht herzlich bedanken! Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinen Arbeitskollegen, für die sachliche und manchmal auch etwas weniger sachliche Unterstützung, Zusammenarbeit und Unterhaltung.

Des Weiteren möchte ich hier darauf hinweisen, dass aufgrund des Leseflusses alle personenbezogenen Bezeichnungen in dieser Arbeit geschlechtsneutral zu verstehen sind.

Kurzfassung

Ausgehend vom Wunsch einer unfallfreien Straße und einer dafür gegründeten EU-Initiative die das Ziel hatte, die Zahl der Verkehrstoten im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 zu halbieren, wurden die Anstrengungen verstärkt, nicht nur die Straßen, sondern auch die Fahrzeuge sicherer zu machen. Da vor allem die Entwicklung der sogenannten passiven Sicherheitssysteme in den letzten Jahrzehnten vorangetrieben wurde, gibt es in diesem Bereich mittlerweile nur mehr eingeschränktes Verbesserungspotential. Aufgrund des technologischen Fortschrittes in der Elektronik wird vermehrt im Gebiet der aktiven Sicherheit (ABS, ESP, etc.) geforscht. Dieses Gebiet wird durch immer leistungsfähigere und kostengünstigere Umgebungserkennungssensoren erweitert, wodurch auch aktive Sicherheitssysteme, welche auf Umgebungserkennungssensoren basieren (automatischer Notbremsassistent, Fahrspurassistent, etc.), in diesen Systemen Anwendung finden. Für Gesamtfahrzeugtests mit integrierten aktiven Sicherheitssystemen sind aufgrund der stark szenarienabhängigen Ergebnisse reproduzierbare Tests unumgänglich. Da moderne Sensoren bereits im Zentimeterbereich auflösen, liegt natürlich auch die Forderung der maximal zulässigen Abweichungen vom Vorgabekurs in diesem Bereich. Solche Tests sind jedoch selbst für geübte Testfahrer kaum reproduzierbar zu fahren. Um auch zukünftige Systeme effizient und reproduzierbar testen zu können, entstand die Idee der aktiven Sicherheitsumgebung, welche die Tests mit robotergesteuerten Fahrzeugen durchführt. Im Zuge dieser Dissertation wurden Überlegungen hinsichtlich der Anforderungen an eine entsprechende Teststrecke, den Betriebszuständen der automatisierten Fahrzeuge und möglichen, sowie realisierbaren Testabbruchmaßnahmen durchgeführt. Des Weiteren wurde eine Software entwickelt, die Anwender sowohl bei der Planung, als auch bei der Testabbruchplanung unterstützt, da automatisierten Fahrzeugen ja auch das Stehenbleiben vorgegeben werden muss. Basierend auf einer umfangreichen Hardwareanalyse erfolgte die Auswahl der zu verwendenden Komponenten der aktiven Sicherheitsumgebung, die aus Kostengründen nur mit Modellautos realisiert wurde. Dazu wurden am Modellfahrzeug ein CompactRio und die Kommunikation mit allen Komponenten installiert. Somit ist einerseits die Steuerung des Modellfahrzeuges mittels Überwachungsrechner möglich, andererseits bietet dies die Grundlage für die Regelung. Mittels der, in die Modellautos integrierten Regelung, lassen sich Szenarien reproduzierbar abfahren und somit kann die entwickelte aktive Sicherheitsumgebung als Grundlage für weitere Forschungsprojekte dienen.

Abstract

Originating from the strive for accident-free roads and an EC initiative aiming to halve road-fatalities between 2000 and 2010 efforts for enhanced road- and vehicle-safety were increased. In the last decades development focused on passive safety systems. In the meanwhile very little headroom for improvements remains. Due to tremendous advances in electronics, the focus was shifted to active safety systems - which are superior to passive-systems also with respect to costs and benefits.

Cheap and powerful surveillance sensors, which are used in active safety systems, became available. For testing of active safety systems reproducible test procedure are required. In particular for testing of the entire vehicle equipped with integrated safety systems (which is the combination of active and passive-safety components). Contemporary surveillance sensors have a resolution in the centimetre-range, which require the precision of testing to lie within that range too. Even experienced test drivers can not replicate test-drives with that precision. A robotic driver therefore is needed.

In this dissertation requirements concerning test-tracks, operating conditions of the automated (robotic) vehicles, and feasible test-abort criterions were developed. Software was developed supporting the test-engineers in planning test-tasks and test-aborts. Analysing numerous hardware-components, the most appropriate products (makes and models) were selected. Eventually a demonstrator was implemented in an R/C car (for reasons of costs and safety). A CompactRio (a programmable real-time automation controller) and field programmable gate arrays were installed. This allowed for controlling and steering the car using the monitoring-computer, as well as for automated driving – with autonomous controlling of throttle, brake and steering.

The demonstrator with integrated-control-system successfully proofed that driving-scenarios can be run in a reproducible way. The developed active-safety testing-environment is a highly promising foundation for future research.

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Gesamtfahrzeugtestumgebungen.....	6
2.1	Stehende oder gezogene Crashhindernisse.....	6
2.2	Ausleger mit Attrappe	7
2.3	Traversenanlagen mit Attrappe	8
2.4	TNO Prüfstand VeHIL	9
2.5	EVITA TU-Darmstadt	11
3	Die geplante Testumgebung – Zielsetzung der Arbeit.....	13
4	Sicherheitsaspekte einer aktiven Sicherheitsumgebung.....	18
4.1	Komponenten einer aktiven Sicherheitsumgebung	18
4.1.1	Fahrzeug	19
4.1.2	Zentralcomputer	21
4.1.3	Menschliche Überwachung	22
4.1.4	Physikalische Barriere.....	23
4.1.5	Rechtliche Absicherung	25
4.1.6	Ergebnis.....	25
4.2	Mögliche Betriebszustände der aktiven Sicherheitsumgebung	26
4.2.1	Betriebszustand: Normaler Testbetrieb	27
4.2.2	Betriebszustand: Testabbruch	28
4.2.3	Betriebszustand: NOTAUS	29
4.2.4	Betriebszustand: Physikalische Barriere	30
4.3	Maßnahmen beim Testabbruch	31
4.3.1	Beispielszenarien für Abbruchmaßnahmen.....	32
4.3.2	Definition der Auslaufräume.....	37
4.3.3	Mögliche Abbruchmaßnahmen	38
5	Planung von Tests mit koordiniert automatisiert fahrenden Fahrzeugen.....	40
5.1	Planung von Testszenarien mit PC-Crash	40
5.1.1	Definitionsmöglichkeiten für die Fahrbahn	41
5.1.2	Fahrzeuge	42
5.1.3	Erstellen von Szenarien	44
5.2	Das Programm Testcenter	46
5.2.1	PC-Crash Datei öffnen	48

5.2.2	PMC Files Importieren.....	48
5.2.3	PMC Datei exportieren.....	49
5.2.4	Bericht erstellen.....	50
5.2.5	Minimalabstandsberechnung.....	50
5.2.6	Abbruchmaßnahmen definieren	52
5.2.7	Lenkparameter.....	54
5.2.8	Bremsparameter	55
5.2.9	Teststreckenumrandung	55
5.2.10	Kollisionscheck	55
5.2.11	DXF Zeichnung:.....	58
5.3	Funktionsüberprüfung der Software Testcenter	59
5.4	Testplanung anhand eines Realbeispiels	63
5.4.1	Schritt 1: Auswahl eines Testszenarios	63
5.4.2	Schritt 2: Planung des Grundszenarios.....	64
5.4.3	Schritt 3: Ermittlung von kritischen, zeitabhängigen Bereichen.....	65
5.4.4	Schritt 4: Definition von Auslaufräumen und Abbruchmaßnahmen	66
5.4.5	Schritt 5: Wirksamkeitsüberprüfung der Abbruchmaßnahmen	67
5.4.6	Schritt 6: Ermittlung von Raumbedarf und sicheren Bereichen.....	68
6	Hardware für eine aktive Sicherheitsumgebung	69
6.1	Positionsmesssysteme.....	69
6.1.1	GPS.....	70
6.1.2	DGPS.....	70
6.1.3	DGPS mit Inertialplattform.....	72
6.1.4	Local Positioning Measurement System	73
6.1.5	Positionsbestimmung mittels WLAN.....	75
6.1.6	Positionsbestimmung mittels optischer Methoden.....	75
6.1.7	Ergebnisse	75
6.2	Funkverbindung.....	78
6.2.1	WLAN (Wireless Local Area Network)	78
6.2.2	GSM / GPRS Netz.....	79
6.2.3	CB Funkdatenübertragung	79
6.2.4	Datenfunksysteme mit serieller Kommunikation.....	79
6.2.5	Ergebnisse	79
6.3	Steuerrechner	80

6.4	Fahrzeugroboter.....	81
6.5	NOTAUS-System.....	82
7	Hardware einer skalierten Sicherheitsumgebung.....	83
7.1	Modellauto.....	83
7.2	Positionsmesssystem	84
7.3	Funkverbindung.....	85
7.4	Steuerungskomponenten.....	85
7.5	Komplettsystem.....	86
8	Steuerungssoftware einer skalierten, aktiven Sicherheitsumgebung	89
8.1	Steuerungssoftware des Modellautos	90
8.2	Einlesen und Verarbeiten des PC-Crash File	91
8.3	Trajektorienvorgabe.....	91
8.4	Erfassen der Positionsdaten (DGPS).....	95
8.5	Speicherung relevanter Daten.....	96
8.6	Steuersignale für Servos und Programmierung des TTL Ausgangs.....	96
8.7	Lenkservo	98
8.8	Motorcontroller.....	99
8.9	Kalibriertest mittels verschiedener Szenarien	99
8.9.1	Kreis (verschiedene Durchmesser).....	100
8.9.2	Gerade (verschiedene Geschwindigkeiten).....	101
9	Regelung des Modellautos	103
9.1	Recherche: Regelungsalgorithmen für die Fahrzeugführung	104
9.2	Modellparameter.....	105
9.3	Einspurmodell.....	108
9.4	Regelung.....	110
9.4.1	Querregler.....	111
9.4.2	Längsregler.....	119
10	Zusammenfassung.....	122
11	Aktueller Stand und weiterer Ausblick	125
12	Begriffe.....	128
13	Abbildungsverzeichnis	130
14	Tabellenverzeichnis.....	133
15	Diagramme	134
16	Quellenverzeichnis	135

1 Einleitung

Im Jahr 2001 gab es eine EU-Initiative [13, 2001] mit dem Ziel, die Zahl der Verkehrstoten auf den Straßen im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 zu halbieren. Selbstverständlich wurde auch schon vorher auf die Sicherheit im Straßenverkehr Wert gelegt, doch wurden durch diese Initiative die Anstrengungen verstärkt, nicht nur die Straßen (Infrastruktur), sondern auch die Fahrzeuge sicherer zu machen. Dabei stellt sich jedoch das Problem, dass vor allem die „passiven Sicherheitssysteme“, die ab dem Zeitpunkt der Kollision wirken, bereits nahezu ausgereizt sind, da sich die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten vor allem darauf spezialisiert hat. Aufgrund der Entwicklung immer besserer und kostengünstiger Sensorik wird nun zusätzlich versucht, aktiv in das Unfallgeschehen (vorausschauende Handlungen) einzugreifen, um Unfälle zu vermeiden, beziehungsweise die Unfallschwere zu reduzieren. Durch den technologischen Fortschritt ergeben sich aber nicht nur neue Möglichkeiten in der aktiven Sicherheit, auch die passiven Sicherheitsmaßnahmen können durch Kenntnis der Umgebung, die durch Sensoren gewonnen wird, verbessert werden. Somit wäre nicht nur eine automatische Vollbremsung sondern auch eine Vorauslösung der Airbags möglich. Da, wie beschrieben, aktive und passive Sicherheitssysteme immer weiter verschmelzen, werden diese Begriffe in der integralen Sicherheit [16, 2008] vereint.

Vor allem die Entwicklung von Systemen mit Umgebungserkennung ist eine der großen Herausforderungen der Fahrzeugentwicklung. Zur Effektivitätsüberprüfung der Sicherheitssysteme sind realitätsnahe und vor allem reproduzierbare Gesamtfahrzeugtests unerlässlich. Im Gegensatz zu den bisherigen Sicherheitssystemen (ABS, ESP), bei denen es im Gesamtfahrzeugtest vor allem darauf ankam, das Erprobungs-Fahrzeug in eine bestimmte fahrdynamische Situation zu bringen, erfordern die aktuellen Systeme Erprobungsszenarien, bei denen es auf die exakte relative Position und Geschwindigkeit von zwei oder mehreren Fahrzeugen ankommt. Dies kann dadurch begründet werden, dass bisherige „aktive Sicherheitssysteme“ vor allem den Fahrer in kritischen Situationen unterstützen sollten. So galt es beispielsweise, das Verhalten des Fahrzeuges bei einer ABS-Bremsung oder das Fahren mit ESP-Eingriff zu testen, beziehungsweise die Regelalgorithmen zu optimieren. Ausgehend von diesem Wunsch war eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit relativ einfach durchführbar und der Erfolg, beziehungsweise der Entwicklungsfortschritt einfach erfassbar.

Aktuelle Sicherheitssysteme (Notbremsassistent, Fahrspurassistent) greifen jedoch immer mehr auf umgebungserkennende Sensoren zurück und versuchen, basierend auf diesen Daten, sicherheitskritische Situationen frühzeitig zu erkennen. Um nun solche Systeme effizient entwickeln zu können, ist es notwendig, Tests durchzuführen, die dem Umgebungserkennungssensor ein möglichst reales Umweltaabbild liefern (problematisch auf Teststrecken). Da jedoch kleinste Änderungen der Umgebung, der Anzahl der Objekte oder der Abstände, für die Sensoren bereits wieder ein vollständig neues Bild ergeben, ist es notwendig, identische Tests durchzuführen. Solche Tests sind jedoch selbst für geübte Testfahrer kaum reproduzierbar zu fahren, so dass die Einflüsse von Modifikationen an dem zu untersuchenden aktiven Sicherheitssystem oft nur mehr statistisch ermittelt werden können. Somit ist eine Vielzahl von Tests notwendig, um aussagekräftige Daten zu erhalten, welche ihrerseits von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängen. Problematisch dabei sind auch jene Fehler des zu überprüfenden „integrierten Sicherheitssystems“, die nur bei einer bestimmten Versuchsanordnung auftreten. Aktuell müssen Tests so oft wiederholt werden bis der Fehler erneut auftritt und die Fehlerquelle ermittelt werden kann. Aus diesen Gründen ist es für die Entwicklung von aktiven Sicherheitskomponenten ideal, wenn die Funktionalität in einer Testumgebung überprüft werden kann, die reproduzierbare, präzise räumliche wie zeitliche Bewegungen von mehreren Fahrzeugen, inklusive einer einfachen Testplanung ermöglicht. Für die durchzuführenden Gesamtfahrzeugversuche werden aus den immer komplexer werdenden Aufgabenstellungen für die Entwicklung von aktiven Sicherheitskomponenten idealerweise benötigte Anforderungen an eine ideale Testumgebung in diesem Kapitel abgeleitet.

Eine der wichtigsten Eigenschaften einer solchen Gesamtfahrzeugtestumgebung stellt zweifelsfrei die erreichbare *Reproduzierbarkeit* dar. So soll die Position aller beteiligten Objekte innerhalb der Testumgebung zu jedem Zeitpunkt exakt bestimmbar sein. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass für die Optimierung der Sicherheitssysteme und auch der Umgebungserkennungssensoren, die Positionsdaten als Vergleichsdaten zur Verfügung stehen. Da es aktuell jedoch kein System gibt, welches die Position kontinuierlich und exakt bestimmen kann, können die Anforderungen an die Positionsbestimmung anhand von aktuellen Umgebungserkennungssensoren und deren Auflösung definiert werden.

Ausgehend von solchen Umgebungserkennungssensoren wie beispielsweise dem „ARS 300 Long Range Radar“ [7] von Continental, ist eine Genauigkeit im hohen Zentimeterbereich (+/- 25 cm) erforderlich, um die korrekte Funktionalität des Sensors zu prüfen. Dieser

Radarsensor besitzt eine Winkelauflösung von einem Grad (entspricht bei einem Abstand von 50 Metern 87 Zentimeter Auflösung). Um jedoch auch zukünftige Umgebungserkennungssensoren, beziehungsweise aktuelle Hochleistungssensoren wie beispielsweise den Laserscanner Ibeo Alasca XT [20] mit einer Winkelauflösung von 0.1 Grad (~10 Zentimeter Auflösung) zu testen, ist eine Auflösung im niedrigen Zentimeterbereich (+/- 5 cm) notwendig.

Selbstverständlich reicht es nicht aus, nur die Position mit einer entsprechend hohen Auflösung zu erhalten, es müssen sich vor allem auch das Testfahrzeug und alle anderen bewegten Objekte möglich exakt entlang ihrer Vorgabetrajektorie bewegen. Die Abweichungen der tatsächlichen Bewegungstrajektorien der bewegten Objekte zu den Vorgabetrajektorien, sollten auch hier im niedrigen Zentimeterbereich liegen.

Neben den Genauigkeitsanforderungen ist auch die *Flexibilität* bezüglich der durchzuführenden Tests entscheidend für eine ideale Gesamtfahrzeugtestumgebung. So müssen beliebige Testszenarien unkompliziert durchführbar sein. Dazu gilt es, Fahrzeuge auf beliebigen Fahrtrajektorien innerhalb der Testumgebung bewegen zu können.

Die *Planung* von komplexen Testszenarien soll möglichst einfach sein. Sinnvoll ist auch, in der Planungsphase zusätzlich Abbruchmaßnahmen für kritische Betriebszustände (Überschreiten von definierten Abweichungstoleranzen zwischen der Soll- und Isttrajektorie von einzelnen Fahrzeugen, etc.) der Testumgebung definiert zu können. Dadurch wird es möglich, kritische Situationen in unkritische überzuführen, um beispielsweise ungewollte Fahrzeugbeschädigungen zu vermeiden.

Ausgehend von den zuvor erwähnten grundlegenden Anforderungen an eine ideale Testumgebung, sind noch zusätzliche Anforderungen zu spezifizieren.

Anforderungen:

- **Erreichbare *Geschwindigkeiten* zumindest 100 km/h:**

Bei diesen Geschwindigkeiten kann auch die korrekte Funktionalität für Autobahnfahrten überprüft werden. Gerade bei hohen Geschwindigkeiten haben aktive Sicherheitssysteme großes Potential, tödliche Unfälle zu vermeiden, beziehungsweise zumindest die Unfallschwere zu reduzieren.

- **Durchführbarkeit von Tests mit *mehreren* Objekten:**

Durch die Verwendung mehrerer Fahrzeuge kann einerseits eine komplexere Situation für Umgebungserkennungssensoren geschaffen werden, andererseits können damit auch zukünftige Systeme, wie beispielsweise eine „Car to Car“ Kommunikation, realistisch getestet werden. Um Systeme jedoch auch in typischen Stadtszenarien zu testen, wird es notwendig, Fußgänger und Radfahrerattrappen in die Tests mit einzubeziehen, um eine realistische Komplexität der Tests (viele Objekte, sowohl ruhende als auch bewegt, mit verschiedenen relativen Trajektorien) zu erhalten und so die Systeme weiterzuentwickeln.

- **Durchführen von Versuchen, bei denen es zu *einer Kollision* kommt:**

Aktuelle, auf Umgebungserkennungssensoren basierende Pre-Crash Systeme wie der Notbremsassistent haben die Aufgabe, vor Gefahrensituationen zu warnen und vor allem die Unfallschwere zu mindern, jedoch nicht den Unfall zu vermeiden. Ausgehend von diesen Anforderungen gilt es, die Sensoren natürlich bis in Kollision zu testen, um Aussagen über deren Funktionalität treffen zu können.

- ***Komplexe Fahrmanöver* durchführbar:**

Aufgrund hochauflösender Umgebungserkennungssensoren und der raschen Weiterentwicklung in diesem Bereich, können immer realistischere und komplexere Situationen richtig aufgelöst und erkannt werden. Für effektive Tests solcher Systeme sind deshalb komplexe Situationen (mehrere bewegte und ruhende Objekte mit teils kreuzenden Trajektorien) und Fahrmanöver unumgänglich. So kann man sich durchaus vorstellen, dass Fahrzeuge auch aktiv ausweichen, um Kollisionen zu vermeiden.

- **Abbildbarkeit der *Wettereinflüsse*:**

Bei Tests von aktiven Sicherheitssystemen, die auf Umgebungssensoren basieren, spielen Witterungseinflüsse eine wichtige Rolle. Gerade deshalb gilt es, diese Sensoren bei verschiedensten Witterungen überprüfen zu können.

- **Abbildbarkeit von *fahrdynamischen* Einflüssen:**

Hiermit kann beispielsweise die Blickwinkelveränderung der Sensoren durch ein Bremsmanöver (Nicken) und die damit verbundene Situationsänderung getestet werden.

2 Aktuelle Gesamtfahrzeugtestumgebungen

In diesem Kapitel sollen Gesamtfahrzeugtestumgebungen vorgestellt werden, die vor allem dem Test aktiver Sicherheitssysteme dienen. Alle im vorigen Kapitel erarbeiteten (gewünschten) Eigenschaften der Gesamtfahrzeugtestumgebung sind nur schwer vollständig realisierbar. Aus diesem Grund entsprechen je nach den gewünschten Anforderungen der Teststreckenbetreiber, Testumgebungen nur in gewissen Teilbereichen denen einer idealen Testumgebung. Nachfolgend werden einige bei OEM und Entwicklern gängige Gesamtfahrzeugtestumgebungen kurz beschrieben und hinsichtlich einer idealen Umgebung bewertet. Dabei bedeutet die Farbe Rot „keinesfalls möglich“, Orange „eingeschränkt möglich“ und Grün „erfüllt die Forderung“.

2.1 *Stehende oder gezogene Crashhindernisse*

Eine sehr einfache und sichere Art, aktive Sicherheitssysteme zu testen, ist die Verwendung von stehenden Hindernissen. Die Hindernisse müssen derart beschaffen sein, dass das Versuchsfahrzeug infolge einer Kollision mit einem Crashhindernis nicht beschädigt wird. Aus diesem Grund sind die eingesetzten Attrappen meist leicht und weich. Zum Einsatz kommen meist aufblasbare Objekte (Balloon Cars, s. Abbildung 1). Ein Nachteil dieser Hindernisse ist jedoch, dass diese die Radareigenschaften realer Fahrzeuge nur begrenzt nachbilden, und sich nicht oder nur sehr eingeschränkt bewegen können.



Abbildung 1: Aufblasbares balloon car [43]

Aufgrund des einfachen Aufbaus gibt es eine Vielzahl von Herstellern welche diese Hindernisse jeweils entsprechend den Anforderungen (Radareigenschaften, Konturen, etc.) herstellen. Ein Beispiel hierfür stellt die Firma Ford [30] dar, die ein eigenes Hindernis für Tests des „adaptive cruise control“, mit realistischen Radareigenschaften entwickelte.

Erreichbare Geschwindigkeit: 100 km/h	Yellow
Durchführbarkeit von Tests mit mehreren Fahrzeugen	Green
Durchführen von Versuchen, bei denen es zum Crash kommt	Green
Komplexe Testfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Green
Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Red
Testreproduzierbarkeit	Yellow
Abbildbarkeit von Wettereinflüssen	Green
Abbildbarkeit von fahrdynamischen Einflüssen auf das Testfahrzeug	Green

Tabelle 1: Bewertung Softcrash

Zwar sind bei Tests durchaus 100 km/h erreichbar, doch ist davon auszugehen, dass bei einer Kollision mit dem Hindernis dieses zerstört wird. Da es sich um gezogene, beziehungsweise stehende Hindernisse handelt, sind komplexe Fahrmanöver nicht durchführbar. Die Wiederholbarkeit ist abhängig vom Testfahrer (Reproduzierbarkeit).

2.2 Ausleger mit Attrappe

Die zu testenden aktiven Sicherheitssysteme können mit Hilfe dieses Systems auch bei bewegten Hindernissen, bis hin zur Kollision getestet werden. Dabei fährt das Testfahrzeug in einer parallelen Spur zum Trägerfahrzeug. Bei dieser Konfiguration wirkt sich das für die Durchführung des Tests notwendige zusätzliche Fahrzeug zwar negativ auf den Test aus, doch werden Radarreflexionen durch Maßnahmen wie Aufbau und Beschichtung weitgehend verhindert. Durch die Verwendung von Fahrzeugattrappen, wie beispielsweise einer Fahrzeugfront oder dem Fahrzeugheck, ergeben sich die typischen Anwendungen dieser Testmethode im Begegnungs- beziehungsweise Folgeverkehr in einer Spur. Bei dieser Anwendung erhält man nicht nur für Radar-, sondern auch für Kamerasysteme weitgehend realitätsnahe Messdaten. Enge Kurvenfahrten und querende Verkehrssituationen sind aber nicht nachstellbar.



Abbildung 2: Ausleger mit Attrappe [8]

Erreichbare Geschwindigkeit: 100 km/h	Grün
Durchführbarkeit von Tests mit mehreren Fahrzeugen	Grün
Durchführen von Versuchen, bei denen es zum Crash kommt	Gelb
Komplexe Testfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Grün
Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Gelb
Testreproduzierbarkeit	Gelb
Abbildbarkeit von Wettereinflüssen	Grün
Abbildbarkeit von fahrzeugdynamischen Einflüssen auf das Testfahrzeug	Grün

Tabelle 2: Bewertung Ausleger

Eine Kollision mit dem Ausleger ist nur mit geringen Differenzgeschwindigkeiten möglich, da es sonst zu Beschädigungen sowohl des Auslegers als auch des Testfahrzeuges kommt.

Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver sind aufgrund der Silhouette nicht möglich (z.B. nur Folgeverkehr). Die Wiederholbarkeit ist hier abhängig von zwei Testfahrern.

2.3 Traversenanlagen mit Attrappe

Bei diesen Systemen wird die Bewegung der Attrappe mittels Seilzug, beziehungsweise dem Verfahren eines Auslegers oder einer Laufkatze realisiert. Damit können relativ einfach Unfälle mit querendem Verkehr, insbesondere Fußgängerunfälle, nachgestellt werden. Wichtig ist dabei, dass die Bewegung der Attrappe exakt mit der Fahrzeugbewegung synchronisiert wird (z.B. mit einer Laserlichtschranke, die auch die Geschwindigkeit ermittelt), um das zu untersuchende Szenario reproduzierbar nachstellen zu können. Die Genauigkeitsanforderungen sind deutlich höher als bei Versuchen mit Längsverkehr. Prinzipiell kann eine solche Anlage durch eine zweite Verfahrachse um einen weiteren Freiheitsgrad ergänzt werden, um auch komplexere Kreuzungssituationen und beispielsweise

Verkehrsszenarien mit Abbiegevorgängen darzustellen. Die dazu benötigten Anlagen werden aber schnell recht groß und aufwändig.



Abbildung 3: Seilzuganlage zur Bewegung von diversen Attrappen [21]

Erreichbare Geschwindigkeit: 100 km/h	
Durchführbarkeit von Tests mit mehreren Fahrzeugen	
Durchführen von Versuchen, bei denen es zum Crash kommt	
Komplexe Testfahrzeugfahrmanöver durchführbar	
Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver durchführbar	
Testreproduzierbarkeit	
Abbildbarkeit von Wettereinflüssen	
Abbildbarkeit von fahrzeugdynamischen Einflüssen auf das Testfahrzeug	

Tabelle 3: Bewertung Traversenanlage

Aufgrund der gezogenen Silhouette ist eine Testdurchführung mit mehreren Fahrzeugen kaum möglich, und auch komplexe Fahrmanöver sind daher nicht realisierbar.

2.4 TNO Prüfstand VeHIL

Bei diesem System befindet sich das Testfahrzeug fixiert auf einem Rollenprüfstand in einer Halle. Die Targetfahrzeuge werden durch so genannte „Moving Bases“, hochdynamisch ansteuerbare Bewegungsplattformen mit vier angetriebenen und gelenkten Rädern realisiert.

Durch eine Koordinatentransformation wird die gesamte Testumgebung in das Koordinatensystem des Testfahrzeugs umgerechnet und die „Moving Bases“ mit der berechneten Differenzgeschwindigkeit längs und quer bewegt.

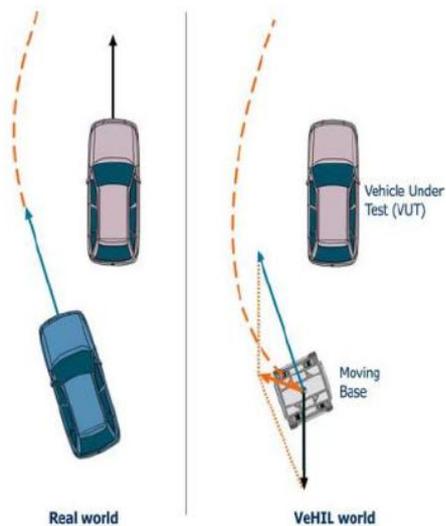


Abbildung 4: Relativbewegung der Moving Base [37]

Für die Nachstellung von Szenarien werden deshalb, basierend auf den aktuellen Rollenprüfstandsdaten (Beschleunigung, Lenkwinkel, etc.), die notwendigen Relativbewegungen online berechnet und von den „Moving Bases“ nachgestellt. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass komplexe und gefährliche Fahrsituationen in zwei Dimensionen beliebig nachstellbar sind. Durch die Computersteuerung ist dieser fahrerlose Testbetrieb trotzdem sicher. Ein Nachteil - bezogen auf die idealen Anforderungen an eine Testumgebung - ist, dass die Fahrdynamik (z.B. Nickbewegung, etc.) des Testfahrzeugs und die Hintergrundbewegung der Szene nicht abgebildet werden kann. Dadurch stellt sich die Frage wie die Systeme in realer Umgebung funktionieren.



Abbildung 5: Testfahrzeug auf dem Rollenprüfstand der Testumgebung VeHIL mit zwei Moving Bases [37]

Erreichbare Geschwindigkeit: 100 km/h	Orange
Durchführbarkeit von Tests mit mehreren Fahrzeugen	Grün
Durchführen von Versuchen, bei denen es zum Crash kommt	Rot
Komplexe Testfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Orange
Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver durchführbar	Grün
Testreproduzierbarkeit	Grün
Abbildbarkeit von Wettereinflüssen	Rot
Abbildbarkeit von fahrdynamischen Einflüssen auf das Testfahrzeug	Grün

Tabelle 4: Bewertung VeHIL

Beim System VeHIL werden nur Relativbewegungen abgebildet, deshalb die orangefarbene Bewertung der absoluten Geschwindigkeit (erreichbare Geschwindigkeit) und den komplexen Fahrmanövern. Aufgrund der verwendeten Komponenten darf es zu keinen Kollisionen kommen. Da sich VeHIL in einem Testlabor (Halle) befindet, können keine Wettereinflüsse abgebildet werden.

2.5 EVITA TU-Darmstadt

Das System EVITA [17] ist vor allem hilfreich bei Tests von Fahrerassistenzsystemen. Das System besteht im Wesentlichen aus einem gezogenen Anhänger (s. Abbildung 6), der über ein Stahlseil und einer Winde mit dem Zugfahrzeug verbunden ist. Dieser Anhänger kann unabhängig vom Zugfahrzeug gebremst und mittels der Winde auch wieder an das Fahrzeug

herangebracht werden. Der große Vorteil, der sich durch diese Konstruktion ergibt, ist die Möglichkeit, ein Szenario, bei dem es zu einer Notbremsung (z.B. Autobahn) vor einem zu testenden Fahrzeug kommt, sicher und kollisionsfrei nachzustellen. Sollte bei einem Test ein vorgegebener Sicherheitsabstand unterschritten werden und dadurch eine Kollision möglich sein, wird die abrollende Winde fixiert und der Anhänger sehr schnell auf die Zugfahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt.



Abbildung 6: EVITA TU-Darmstadt [17]

Erreichbare Geschwindigkeit: 100 km/h	
Durchführbarkeit von Tests mit mehreren Fahrzeugen	
Durchführen von Versuchen, bei denen es zum Crash kommt	
Komplexe Testfahrzeugfahrmanöver durchführbar	
Komplexe Targetfahrzeugfahrmanöver durchführbar	
Testreproduzierbarkeit	
Abbildbarkeit von Wettereinflüssen	
Abbildbarkeit von fahrdynamischen Einflüssen auf das Testfahrzeug	

Tabelle 5: Bewertung EVITA

Bei einer Kollision ist mit erheblichen Beschädigungen, sowohl des Anhängers, als auch des Testfahrzeuges zu rechnen. Komplexe Fahrmanöver sind nicht möglich, da die Silhouette auf den Folgeverkehr ausgelegt ist.

3 Die geplante Testumgebung – Zielsetzung der Arbeit

Die in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Testeinrichtungen sind jeweils für spezielle Testszenarien gut geeignet und effizient: „Balloon Cars“ eignen sich als passives Target für Quer- und Längsverkehr, die Auslegerlösung hauptsächlich für Längsverkehr. Die Traversenanlage kommt bei querendem Verkehr zum Einsatz. Relativ flexibel ist die VeHIL-Lösung. Die Koordinatentransformation führt aber aus Sicht der Sensoren des Systemfahrzeugs zu einem nicht realistischen, starren Hintergrund. So hat jede der Testeinrichtungen ihre Grenzen. Diese treten insbesondere dann zu Tage, wenn Assistenzsysteme mit mehreren beteiligten (bewegten) Fahrzeugen zu erproben sind. Beim Bau moderner Fahrzeuge liegt das Interesse jedoch nicht nur am Schutz der Insassen im Kollisionsfall, ideal wäre es, auch Kollisionen mit Fußgängern und Radfahrern zu vermeiden. Doch genau diese beiden Gruppen sind mit den klassischen Testmethoden für Sensoren kaum realistisch abzubilden. Es gilt also, eine Testumgebung zu entwickeln, die möglichst der idealen Testumgebung entspricht.

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit entwickelte Testumgebung mit den erfüllbaren Anforderungen und Möglichkeiten näher beschrieben. Aufgrund der Tatsache, dass Tests mit Testfahrern von der jeweiligen Person und deren Verfassung abhängig sind, ist es kaum möglich, Tests auf unterschiedlichen Teststrecken zu unterschiedlichen Zeitpunkten reproduzierbar durchzuführen. Selbst eine elektronische Unterstützung würde kaum ausreichen, Kurse mit Abweichungen im Zentimeterbereich abzufahren. Des Weiteren gilt es natürlich, vor allem kritische Situationen, in denen die aktiven Sicherheitssysteme eingreifen sollen, zu testen. Da bei diesen Situationen mehrere bewegte Objekte wie Fußgänger und andere Fahrzeuge die Komplexität erhöhen, und die Test auch mit möglichst realistischen Geschwindigkeiten durchgeführt werden sollen, ist das Gefahrenpotential für die Testfahrer und die Testfahrzeuge (Prototypen) entsprechend hoch.

Stellt man sich beispielsweise ein Szenario einer knappen Vorbeifahrt in einer Kreuzung wie in Abbildung 7 (zwei Fahrzeuge kreuzen eine Straße mit einem minimalen Abstand von 10 Zentimetern) vor, um Radar oder Lidar Sensoren zu testen, so ist das Gefahrenpotential offensichtlich. Bereits die kleinsten Abweichungen von Soll- und Ist- Position können zu einer für Menschen gefährlichen Kollision führen.

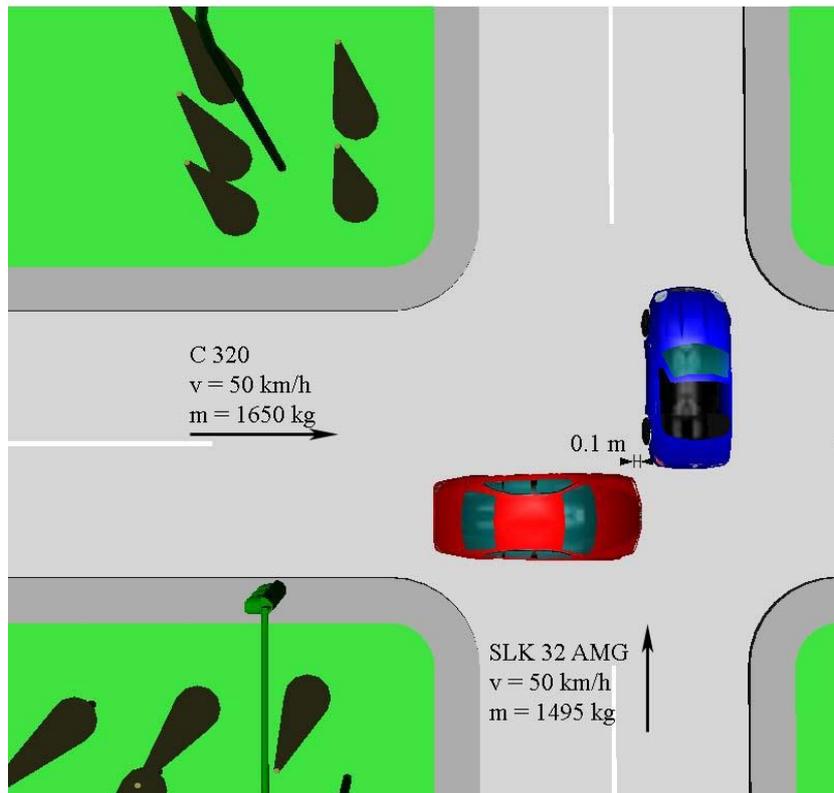


Abbildung 7: Kreuzungsszenario

Aus diesem Grund soll die neue Testumgebung Fahrzeuge mittels Lenk-, Brems- und Gasroboter automatisiert steuern. Durch die Verwendung von Robotern ergeben sich mehrere Vorteile, doch auch Nachteile. Zum Zeitpunkt des Starts dieser Dissertation wurden Robotersysteme hauptsächlich für Fahrdynamiktests eingesetzt, bei denen ein Testfahrer im Fahrzeug jederzeit die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen konnte. Es war dadurch möglich, ein und dasselbe Fahrmanöver beliebig oft durchzuführen. Dabei musste jedoch nicht darauf geachtet werden, das Manöver zeitlich und örtlich korrekt durchzuführen, was aber im Hinblick auf mehrere bewegte Objekte unbedingt notwendig ist, um eine sichere Durchführung zu gewährleisten. Um diese zeitliche und örtliche Zuordnung durchführen zu können, ist eine genaue Positionsbestimmung, in Relation zur Zeit, unumgänglich. Durch die Positionsbestimmung ist es möglich, eine Regelung für die Roboter zu entwickeln, die das Fahrzeug auf der Solltrajektorie unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen führt. Diese geführte Bewegung der Fahrzeuge wird als koordiniertes, automatisiertes Fahren bezeichnet und in weiterer Folge auch so verwendet. Dies ist vom autonomen Fahren zu unterscheiden, denn dabei interagieren Fahrzeuge mit der Umgebung und passen den zu fahrenden Kurs automatisch an.

Die Vorteile einer Testumgebung mit koordiniert automatisierten Fahrzeugen sind klar ersichtlich. Auch bei kritischen Tests kann im schlimmsten Fall *nur* ein Sachschaden entstehen. Durch die Verwendung von Robotern lassen sich die Tests beliebig oft mit minimalen Abweichungen wiederholen und es treten weder Ermüdung (bei Personen), noch sonstige Probleme auf, die eine umfangreiche statistische Auswertung erforderlich machen würden.

Der typische Testablauf beginnt mit dem Positionieren der automatisierten Fahrzeuge, beispielsweise über einen Remotezugriff auf den Steuerrechner. Gestartet wird der Test für alle Fahrzeuge über die GPS-Zeit. Nach dem Start bewegen sich alle Fahrzeuge entlang der vorgegebenen Trajektorien (innerhalb der zulässigen Toleranzen). Am Ende des Tests sind für alle Fahrzeuge Haltepunkte, definiert auf denen die Fahrzeuge zum Stillstand kommen. Für den neuerlichen Teststart müssen nun die Fahrzeuge wieder auf die Testausgangspositionen gebracht werden.

Dieses System hat aber auch einen entscheidenden Nachteil, der mit zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen bedacht werden muss. Da sich kein Fahrer in den Fahrzeugen befindet und die Fahrzeuge von Robotern gesteuert werden, müssen eventuell auftretende Fehler schon im Vorhinein bedacht werden, um im Ernstfall entsprechend schnell reagieren zu können. Es ist also eine Erweiterung des Sicherheitskonzeptes für Teststrecken notwendig. Aktuell ist ein derart umfangreiches Sicherheitskonzept nicht notwendig, da typischerweise der Testfahrer eingreifen kann. Da von logischem Verhalten (Fahrer weicht Hindernissen selbstständig aus) der Testfahrer auf einer Teststrecke auszugehen ist, ist es beispielsweise nicht notwendig, sich über einen Testabbruch Gedanken zu machen. Wird jedoch bei automatisierten Fahrzeugen, beispielsweise beim vorangegangenen Kreuzungsszenario, im Fehlerfall zuerst eine Bremsung des blauen Fahrzeugs eingeleitet (rotes folgt mit Verzögerung aufgrund der Kommunikation), kann es gerade durch diese Maßnahme zur Kollisionen kommen. Bei der Verwendung von koordiniert automatisierten Fahrzeugen muss also auch der Testabbruch geplant werden, da sich die Fahrzeuge, nur wie geplant, auf vorgegebenen Trajektorien bewegen.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine neuartige Testumgebung aufzubauen, die sichere, automatisierte, reproduzierbare Tests mit mehreren Fahrzeugen ermöglicht. Ausgehend von dieser Forderung ist es notwendig, aktuelle Teststrecken völlig neu, hinsichtlich der vorhandenen

Sicherheitsstandards für automatisiertes Fahren zu bewerten beziehungsweise überhaupt Standards für automatisierte Teststrecken zu definieren. Auch werden Vorschläge erarbeitet, welche Veränderungen, beziehungsweise Erweiterungen durchgeführt werden müssen, um die Teststrecke an automatisiert fahrende Fahrzeuge anzupassen. Da es bisher zur Sicherheitsthematik automatisiert fahrender Fahrzeuge, für regelmäßige Tests auf Teststrecken keinerlei Überlegungen gegeben hat, sollen in dieser Arbeit auch die erforderlichen Analysen für den sicheren Betrieb der automatisiert fahrenden Fahrzeuge durchgeführt werden.

Um eine sichere Planung von Tests mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen zu ermöglichen, müssen verschiedenste Einflussparameter, wie die zur Verfügung stehende Teststrecke, die Eigenheiten der verwendeten Fahrzeuge, die erlaubten und auftretenden Positionstoleranzen und viele mehr (s. Kapitel 5), berücksichtigt werden. Selbstverständlich müssen die Planungsparameter mit jenen der Realteststrecke möglichst genau übereinstimmen, da bereits „Kleinigkeiten“ wie eine Pfütze (maximale Verzögerung wird verringert) oder die Verwendung eines Coupés anstelle eines Combis (Längenunterschied) zu Kollisionen führen können.

Nicht nur die Testdurchführung, sondern vor allem auch der Testabbruch zählt bei automatisiert fahrenden Fahrzeugen zur Sicherheitsthematik, die im Zuge dieser Arbeit völlig neu erarbeitet wird. Durch die komplexe Thematik bei robotergesteuerten Fahrzeugen und den damit verbundenen umfangreichen (beliebigen) Möglichkeiten beim Testabbruch (ein Fahrzeug kann nicht nur gebremst werden, es sind auch beliebige Fahrmanöver, beispielsweise Ausweichen, realisierbar), gilt es, Manöver zu definieren, die die Komplexität des Abbruchs in Grenzen halten und dennoch ausreichen, vielfältige Gefahrensituationen im Testabbruchfall in unkritische überzuführen.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein neuartiges Programm entwickelt, welches die Testingenieure nicht nur bei der Planung der (einfachen) Testszenarien unterstützt, sondern dass vor allem Hilfe bei der Planung der (komplexen) Testabbruchmanöver bietet.

Eine Realisierung von automatisierten Fahrzeugen im Zuge dieser Dissertation, kann aufgrund der hohen Kosten für Roboter und Teststrecke nur mit Modellfahrzeugen erfolgen. Es soll dennoch aufgezeigt werden, dass reproduzierbares Fahren für die Verwendung als

Testmethode für aktive Sicherheitssysteme sehr gut geeignet ist und die Testmethode der Zukunft darstellt. Um jedoch (für die Zukunft) eine Erweiterungsmöglichkeit von der kleinen, aktiven Sicherheitsumgebung auf eine aktive Sicherheitsumgebung im Großen zu berücksichtigen, wird aktuelle Hardware, die in einer aktiven Sicherheitsumgebung Anwendung findet, hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten, sowohl im Modellauto, als auch im realen Fahrzeug analysiert und möglichst so ausgewählt, dass eine Umrüstung mit den verwendeten Komponenten möglich ist.

Parallel zu den Arbeiten an der kleinen, aktiven Sicherheitsumgebung wurde eine aktive Sicherheitsumgebung im Großen von der Firma Daimler AG geschaffen. Da die Idee dieser Dissertation in Zusammenarbeit mit der Daimler AG entstanden ist, sind vor allem die Sicherheitsüberlegungen, die im Zuge dieser Dissertation getätigt wurden, bei der Errichtung der aktiven Sicherheitsumgebung der Daimler AG mit eingeflossen. Auch die entwickelte Sicherheitssoftware wird bei der Daimler AG für die Überprüfung der Testabbruchmaßnahmen bei komplexen Szenarien verwendet. Das Automatisieren der Fahrzeuge wurde von der Firma Anthony Best Dynamics (ABD) realisiert, da ABD bereits langjährige Erfahrung im Bereich Roboter und Fahrzeugsteuerung aufweist und somit einen nicht einholbaren Vorsprung auf diesem Gebiet besitzt. Durch die parallele Realisierung beider Sicherheitsumgebungen war es möglich, die Sicherheitsüberlegungen realitätsnahe an beide Sicherheitsumgebungen anzupassen, da selbstverständlich für eine kleine Sicherheitsumgebung andere Erfordernisse gelten als für eine große.

Im nächsten Kapitel wird nun eine umfassende Sicherheitsbetrachtung möglicher Fehler und der zu treffenden Aktionen ausführlich beschrieben.

4 Sicherheitsaspekte einer aktiven Sicherheitsumgebung

Bei Tests mit koordiniert automatisierten Fahrzeugen ist neben dem „normalen“ Testbetrieb (s. Kapitel 4.2.1) ein generelles Sicherheitskonzept unbedingt notwendig. Auftretende Fehler bei den beteiligten Komponenten können zu kritischen Situationen führen, welche zur ungewollten Gefährdung von Mensch und Material auf den Teststrecken führen können. Um diese Gefährdung zu minimieren, wurde in dieser Arbeit ein spezielles Sicherheitskonzept für koordiniertes, automatisiertes Fahren entwickelt. Für dieses Sicherheitskonzept ist es notwendig, die verschiedenen Betriebszustände der Testumgebung näher zu definieren, beziehungsweise zu analysieren. Ziel ist es, Strategien zu entwickeln, um die beteiligten Fahrzeuge definiert in einen unkritischen Zustand zu bringen. Dies bedeutet, dass ein für Personen gefahrloser Betrieb der Testumgebung garantiert werden kann.

Da jedoch ein allgemeines Sicherheitskonzept (Straßenverkehrsregeln, Sicherheitsverantwortlicher, etc.) für eine automatisierte Teststrecke nicht ausreicht, muss bereits bei der Planung der Testszenarien mit den Sicherheitsüberlegungen begonnen werden. Es gilt bei koordiniert automatisierten Fahrzeugen, dass nicht nur die Testtrajektorie, sondern auch das Verhalten der Fahrzeuge im Abbruchfall geplant werden muss. Da prinzipiell davon ausgegangen werden kann, dass ein Fehler beim Testabbruch vorliegt, müssen die Abbruchkonzepte so gewählt werden, dass möglichst alle beteiligten Objekte ohne Kollision zum Stillstand gebracht werden können. Auch zu diesem Thema erfolgt in diesem Kapitel eine ausführliche Analyse.

4.1 Komponenten einer aktiven Sicherheitsumgebung

Zu Beginn werden alle Komponenten, die für koordiniertes, automatisiertes Fahren benötigt werden, hinsichtlich sicherheitsrelevanter Eigenschaften analysiert und anschließend in einer schematischen Darstellung der Testumgebung eingeordnet.

4.1.1 Fahrzeug

Die erste Ebene umfasst die Fahrzeuge und die darin befindlichen Komponenten, welche für ein koordiniertes, automatisiertes Fahren notwendig sind.

Die Komponenten umfassen neben einem Bremsroboter, einem Gaspedalroboter und einem Lenkroboter auch einen Steuerrechner, der für das koordinierte, automatisierte Fahren zuständig ist. Abhängig vom gewählten Fahrzeugtyp kann es aber auch möglich sein, verschiedene Fahrzeugkomponenten über eine fahrzeuginterne Schnittstelle anzusteuern (elektronisches Gaspedal, etc.). Eine weitere wichtige Komponente ist das Positionsbestimmungssystem. Die gesamte Teststreckenüberwachung und Sicherheit basiert auf den Positionsdaten aller Objekte auf der Teststrecke. Selbstverständlich bedarf es auch einer entsprechend sicheren Kommunikation zwischen Basisstation und den Fahrzeugen. Um das Fahrzeug auch bei schweren Fehlern (Status: NOTAUS) noch „sicher“ zum Stillstand zu bringen, werden zusätzlich eine autarke Notbremse und eine Spritsperre in die Testfahrzeuge eingebaut. Diese beiden Komponenten sollen dabei unabhängig vom Steuerrechner des Fahrzeuges aktiviert werden können.

Im normalen Betrieb ist der Steuerrechner nicht nur für die exakte Spurfolge verantwortlich, er überwacht auch noch zusätzlich folgende Funktionen:

- **Fahrzeugstatus:**

Der Fahrzeugstatus umfasst ganz generell die standardmäßig eingebauten technischen Systeme des Fahrzeuges (z.B. Motor, Öl Druck, Kühlflüssigkeitstemperatur). Natürlich wird bei der Überwachung zwischen verschiedenen Fahrzeugzuständen unterschieden (korrekte Funktion, Warnung, Fehler).

- **Komponentenstatus:**

Dabei werden die zusätzlich ins Fahrzeug integrierten Komponenten wie die Roboter (Lenk-, Brems-, Gas-, etc.) und die Kommunikation überwacht und bei einer Fehlfunktion die entsprechenden Maßnahmen (NOTAUS s. Kapitel 4.2.3) eingeleitet.

- **Toleranz:**

Mit den Toleranzen sind die zulässigen Abweichungen der Ist- von der Sollposition gemeint.

Da eine exakte Positionsbestimmung und eine exakte Pfadregelung des Fahrzeugs nicht möglich sind, kann mit Hilfe der Toleranzen (zulässige laterale und longitudinale Abweichung) der zulässige Bereich definiert werden, in dem sich die Fahrzeuge zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden müssen. Diese Toleranzen können aber entlang des Kurses unterschiedlich sein und sind in Abbildung 8 durch Kreise (beide Abweichungen sind gleich groß) symbolisiert. Zu Beginn des Szenarios können die zulässigen Abweichungen größer gewählt werden, da sich in diesem Bereich keine Hindernisse befinden und somit die Gefahr einer Kollision gering ist. Im Kreuzungsbereich hingegen, wo der Abstand zwischen den Fahrzeugen geringer ist, muss natürlich auch die Position entsprechend „genauer“ sein, um eine ungewollte Kollision zu vermeiden. Aus diesem Grund sollten die zulässigen Toleranzen kleiner gewählt werden.

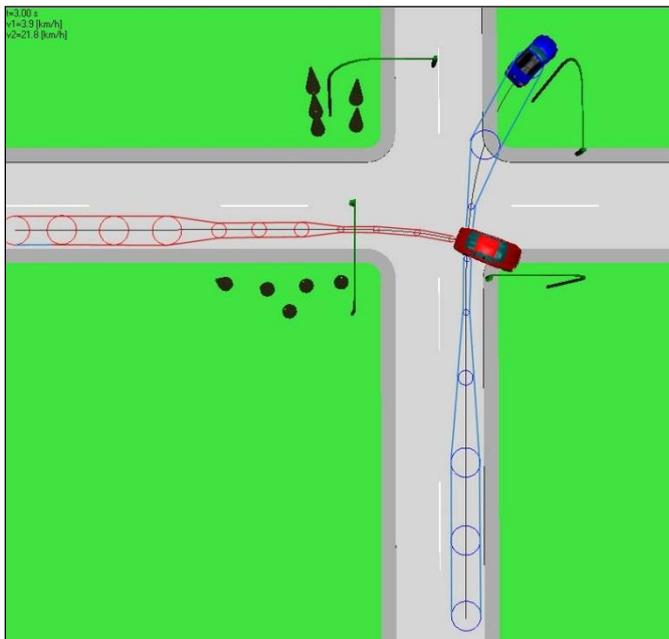


Abbildung 8: Positionstoleranzen in Abhängigkeit der Fahrzeugposition

- **Unschärfe der Fahrzeugposition:**

Positionsbestimmungssysteme unterliegen verschiedensten externen Einflüssen. So ist beispielsweise die Positionsbestimmung mittels DGPS und Inertialplattform sehr stark von der Anzahl der zur Verfügung stehenden GPS-Satelliten abhängig (s. Kapitel 6.1.3). Unter idealen Bedingungen beträgt der Maximalfehler zirka +/- 2 cm. Treten jedoch Abschattungen auf und stehen damit nur noch wenige Satelliten zur Positionsbestimmung zur Verfügung, kann sich die Unschärfe auf das Zehnfache der sonst üblichen Positionsgenauigkeit erhöhen. Wird nun die Unschärfe größer als die zulässige Positionstoleranz, können die Versuche nicht

mehr mit der gewünschten Genauigkeit durchgeführt werden, da die Regelung nur so genau sein kann wie die Position bestimmbar ist, und müssen daher auf alle Fälle abgebrochen werden.

- **Fehlermeldungen vom Zentralrechner weitergeleitet:**

Treten bei einem Testfahrzeug Fehler auf, so werden diese sofort an den Zentralrechner weitergeleitet (Statusübermittlung). Dieser wiederum sendet einen entsprechenden Befehl „Testabbruch“ an die restlichen Fahrzeuge.

- **Testabbruch:**

Der sich im Fahrzeug befindliche Steuerrechner überwacht den Testabbruch. Der definierte Testabbruch wird anhand der aktuellen Positionsdaten des Fahrzeuges durchgeführt. Er besteht beispielsweise nur aus bremsen, kann aber auch aus einem Lenk- oder sogar Beschleunigungsmanöver bestehen. Stellt der Steuerrechner noch zusätzliche Fehler während des Testabbruchs fest, wird entsprechend reagiert und die Steuerung wechselt in den NOTAUS Status.

Die Fahrzeugregelung übernimmt also nicht nur den normalen Testbetrieb, sondern überwacht auch die Testabbrüche. Jeder Statuswechsel wird sofort an den Zentralcomputer übermittelt, dieser leitet ihn an alle anderen Fahrzeuge weiter.

4.1.2 Zentralcomputer

Ein Zentralcomputer übernimmt mehrere Aufgaben: Er überwacht den Status der einzelnen Fahrzeuge und die ordnungsgemäße Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und dem Zentralrechner. Auch dient er dem bedienenden Personal als Überwachungsanzeige, sodass dieses jederzeit die Situation auf der Teststrecke einschätzen und notfalls eingreifen kann (z.B. bei Personen auf der Teststrecke).

Tritt während des Tests eine Störung bei einem Fahrzeug auf (diese wird an den Zentralcomputer übermittelt), werden alle beteiligten Fahrzeuge automatisch durch den Zentralrechner in den Testabbruchstatus versetzt. Treten während des Testabbruchs weitere Fehler auf (Bremsversagen, etc.), so veranlasst der Zentralcomputer den Wechsel aller beteiligten bewegten Objekte in den NOTAUS Status.

Des Weiteren kann der Zentralcomputer zur Testplanung (Szenarienplanung, Sicherheitsmaßnahmen, Verhalten bei Sondersituationen, etc.) verwendet werden. Bei der Planung werden die Solltrajektorien, die Toleranzen und die Abbruchmaßnahmen ermittelt und anschließend an die Fahrzeugrechner übermittelt.

4.1.3 Menschliche Überwachung

Die gesamte Testumgebung muss von einem zentralen Punkt aus durch eine Person überwacht werden. Dieser Anlagenleiter ist für den sicheren Betrieb der Anlage verantwortlich. Da eine vollständig automatische Überwachung einer ganzen Teststrecke aufgrund nicht vorhersehbarer Ereignisse kaum durchführbar ist, ist es notwendig, dass die oberste Instanz eine überwachende Person ist.

Über den Zentralcomputer erhält dieser Anlagenleiter zusätzlich Informationen über den Systemzustand der Anlage und kann jederzeit manuell einen Testabbruch bei nicht vorhersehbaren oder nicht berücksichtigten Situationen durchführen. Die Abschaltung mittels NOTAUS wird parallel und daher unabhängig vom Zentralcomputer realisiert, da auch Fehler beim Zentralcomputer auftreten können (Anlagenleiter kann sowohl Testabbruch als auch NOTAUS einleiten).

Die weiteren Aufgaben dieses Anlagenleiters sind die Schulung der Versuchsleiter (zuständig für jeweilige Versuche), das Einweisen der sonstigen Beteiligten und das Durchgehen der Checklisten zur Inbetriebnahme (Versuchsstart) der Testumgebung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass gerade bei kritischen Tests dieser Anlagenleiter nur eine Kontrollfunktion einnimmt, da eine vollständige Überwachung der korrekten Positionen und der vollständigen Funktionsfähigkeit durch eine Person kaum wahrgenommen werden kann. Da diese Überwachung aber automatisch vom Zentralrechner ausgeführt wird, hat der Anlagenleiter die Aufgabe, die Teststrecke im Hinblick auf Ereignisse zu überwachen, die nicht durch die automatisierten Sicherheitsstrukturen der koordiniert automatisierten Fahrzeuge erkannt werden können, beziehungsweise nicht bedacht wurden. Aus diesem Grund ist ein Leitstand mit entsprechender Übersicht für eine aktive Sicherheitsumgebung unumgänglich.

Folgende Punkte sind bei der Errichtung eines Leitstandes zu beachten:

- **Guter Überblick über die Testanlage**

Der Anlagenleiter oder entsprechendes Personal muss die gesamte Anlage während des Tests im Blickfeld behalten, um bei unerwartet auftretenden Problemen einen Testabbruch oder NOTAUS einzuleiten.

- **Statusanzeigen am Zentralcomputer**

Anhand der Statusanzeigen des Zentralcomputers soll eine klare und einfache Aussage betreffend des Zustands (Testfahrzeuge, Kommunikation, etc.) der gesamten Testumgebung getroffen werden können.

- **Optische und akustische Warnung durch den Zentralcomputer**

Zusätzlich zur Statusanzeige sollen im Fehlerfall oder bei beinahe-Fehlern (z.B. 80 % der zulässigen Abweichung überschritten) Warnsignale erzeugt werden, die das bedienende Personal auf mögliche kritische Situationen hinweist.

- **Visualisierung der Gesamtsituation der Testanlage am Zentralcomputer**

Am Zentralcomputer soll eine Darstellung des Testablaufs erfolgen, um die aktuelle Situation, aber auch das weitere Geschehen besser erfassen zu können.

- **Remotesteuerung zum ferngesteuerten Fahren der verwendeten Fahrzeuge**

Falls sich Fahrzeuge in einer Parkposition befinden, können diese über eine Remotesteuerung in die Ausgangsposition oder nach dem Test wieder dorthin zurück gebracht werden. Die Remotesteuerung nutzt den Zentralcomputer als Steuerungshardware.

4.1.4 Physikalische Barriere

Da die koordiniert automatisiert fahrenden Fahrzeuge keine eigenständige Logik an sich besitzen und Sicherheitsmaßnahmen weitgehend über Funkverbindungen übermittelt werden, muss bei einer derartigen Testumgebung davon ausgegangen werden, dass auch schwerwiegende Fehler (s. Wechsel in den NOTAUS Status, Kapitel 4.2.3) auftreten können. Dies könnte schlimmstenfalls soweit gehen, dass sich ein Fahrzeug unkontrollierbar auf der Teststrecke bewegt. In einem solchen Fall bietet eine Umrandung, die ein ungewolltes

Verlassen der aktiven Sicherheitsumgebung verhindern soll (falls die untergeordneten Sicherheitsmaßnahmen das Fahrzeug nicht rechtzeitig zum Stillstand bringen) einen hardwaremäßigen Schutz der Umwelt.

Es gilt jedoch nicht nur die Fahrzeuge am Verlassen der Teststrecke zu hindern, auch der Leitstand ist durch physikalische Barrieren zusätzlich zu sichern, um das Bedienpersonal und eventuell dort vorhandene Zuschauer zu schützen. Weitere in der Testumgebung befindliche Gebäude, Aussichtspunkte und Ähnliche sind ebenfalls mit physikalischen Barrieren zu sichern.

Da eine Vorhersage betreffend Ausfällen bei robotergesteuerten Fahrzeugen kaum möglich ist, dürfen sich keine Personen während Tests in einem nicht durch Barrieren gesicherten Bereich der Testumgebung aufhalten.

Mögliche physikalische Barrieren:

- Graben
- Wall
- Kiesbett
- Leitschiene
- Betonleitwand
- Zaun (auch gegen illegales Betreten der Anlage)
-

Zu berücksichtigen gilt es weiters, dass nicht alle physikalischen Barrieren für alle Fahrzeuge gleich gut geeignet sind. So kann beispielsweise eine Leitschiene durchaus ausreichend für ein handelsübliches Fahrzeug sein. Sollten in der aktiven Sicherheitsumgebung jedoch auch Lastkraftwagen getestet werden, kann es durchaus zu einem Durchbrechen der Barriere kommen. Es ist also dringend erforderlich, sich auch über die Rückhalteklasse der physikalischen Barriere Gedanken zu machen. Die für die physikalische Barriere zu wählende Rückhalteklasse ist dabei unter anderem von der Maximalgeschwindigkeit, der Masse der Testfahrzeuge und dem Anprallwinkel (max. 90 Grad) abhängig. Durch betriebliche Maßnahmen (Limiter, falls vorhanden) kann sichergestellt werden, dass die Auslegungsgeschwindigkeit der Barriere niedriger gewählt werden kann und diese Geschwindigkeit auch bei Fehlern nicht überschritten wird.

4.1.5 *Rechtliche Absicherung*

Trotz aller getroffenen Sicherheitsmaßnahmen kann es dennoch zu Unfällen auf Teststrecken mit koordiniert automatisiert fahrenden Fahrzeugen kommen. Um die Testumgebung deshalb auch entsprechend rechtlich abzusichern, sind mehrere Punkte zu erfüllen:

- Der Betrieb für koordiniertes, automatisiertes Fahren sollte sich auf abgeschlossenes und dafür vorgesehenes Gelände, welches auch entsprechend gesichert ist, beschränken. Auch muss das vorgesehene Gelände durch einen entsprechenden Sicherheitsbeauftragten abgenommen werden.
- Sicherheits- und Arbeitsanweisungen müssen vorliegen und allen Nutzern bekannt sein.
- Nutzer müssen eingewiesen und befähigt sein, die Automatisierungssysteme zu bedienen.
- Personen dürfen sich nicht im Testgelände aufhalten.

4.1.6 *Ergebnis*



Abbildung 9: Ebenendarstellung der Testumgebung in Bezug auf ein Sicherheitskonzept

Aus der Komponentenanalyse ergibt das Zusammenspiel zwischen den funktionell getrennten Einheiten. Gleichzeitig ergibt sich durch diese Ebenendarstellung eine Hierarchie (von innen, niedrige Priorität nach außen, hohe Priorität) und der Einflussbereich der Sicherheitskomponenten.

So überwachen die Fahrzeuge automatisch ihre Position, beziehungsweise ihre technischen Systeme (Öldruck, etc.) selbst, können aber keinen direkten Einfluss auf andere Fahrzeuge ausüben. Der Zentralrechner überwacht unter anderem alle Fahrzeugbewegungen und kann bei automatisiert erkennbaren kritischen Situationen den Testabbruch für alle Fahrzeuge einleiten. Dieses Zusammenspiel ist der wichtigste Punkt der Sicherheitsebenen, da aufgrund der Szenarien und der damit verbundenen geringen Abstände zwischen den Fahrzeugen, der Mensch kaum noch in der Lage ist, die Situation richtig einzuschätzen.

In der nächst „höheren“ Ebene wird die Testumgebung von einer dafür ausgebildeten Person überwacht, die die Kontrolle sowohl über die Fahrzeuge, als auch über den Zentralrechner besitzt und somit die Testumgebung jederzeit stillsetzen kann.

Es können aber auch Fehler auftreten, bei denen die koordiniert automatisierten Fahrzeuge theoretisch die dafür vorgesehene Testumgebung verlassen würden. Um dies zu verhindern, muss eine physikalische Barriere an den Rändern der Testumgebung errichtet werden.

Die äußerste Ebene ist die rechtliche Absicherung, welche unbedingt für den Betrieb einer Testumgebung mit koordiniert automatisierten Fahrzeugen notwendig ist. Die rechtliche Absicherung, beziehungsweise die geltenden Vorschriften, sind somit für alle eingesetzten Komponenten unbedingt zu beachten und einzuhalten.

4.2 Mögliche Betriebszustände der aktiven Sicherheitsumgebung

Um ein schlüssiges Sicherheitskonzept entwickeln zu können, ist es nicht nur notwendig, die Komponenten zu definieren, es ist auch notwendig, die möglichen Betriebszustände und auch die Übergänge von einem auf den nächsten Betriebszustand der Testumgebung zu definieren.

Grundsätzlich können vier Betriebszustände unterschieden werden. Während des regulären Testbetriebs kann sich die Testumgebung entweder im normalen Testbetrieb oder in einem Testabbruch befinden. Ein Testabbruch bedeutet hier, dass der durchgeführte Test kontrolliert, anhand von vordefinierten Sicherheitsszenarien automatisiert abgebrochen wird.

Treten unvorhergesehene Probleme auf, kann ein automatischer oder manueller Wechsel des Betriebszustandes in den NOTAUS Status erfolgen. Sollten die vorhergehenden Maßnahmen die Fahrzeuge nicht oder zu spät zum Stillstand bringen, bildet die physikalische Barriere die letzte Sicherheitsmaßnahme, die ein Verlassen der Teststrecke von koordiniert automatisch fahrenden Fahrzeugen verhindert.

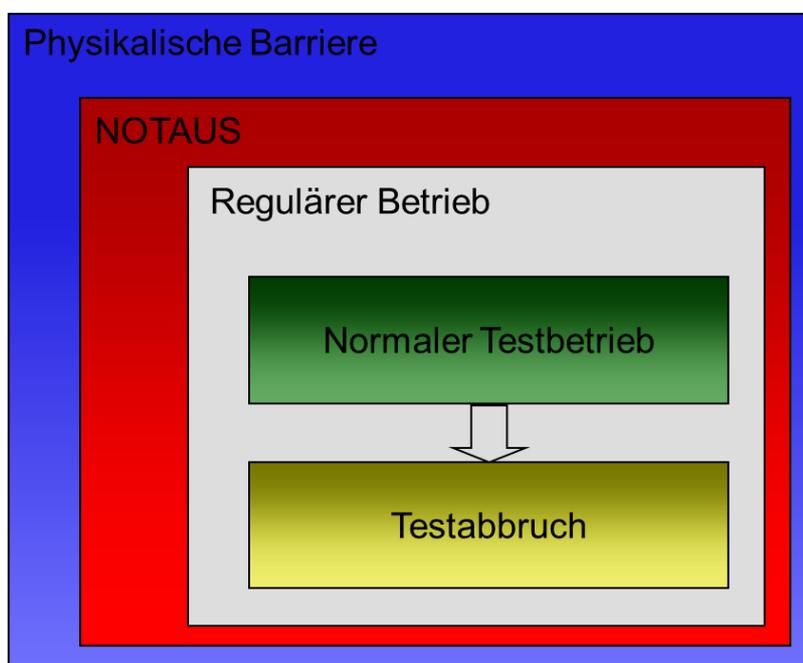


Abbildung 10: Mögliche Betriebszustände der Testumgebung für koordiniert automatisch fahrende Fahrzeuge

Im Folgenden werden die möglichen Betriebszustände kurz beschrieben.

4.2.1 Betriebszustand: Normaler Testbetrieb

Beim „normalen Testbetrieb“ befindet sich das Fahrzeug innerhalb der Positionstoleranzen (Zeit-Ort), die vom Planer vorgegeben wurden, und der entsprechenden Positionsgenauigkeit (tolerierte Unschärfe) des Positionserfassungssystems. Das Fahrzeug selbst und die für die Regelung der Testumgebung notwendigen Komponenten sind voll funktionstüchtig. Die Kommunikation zwischen Steuerrechner und den im Fahrzeug befindlichen Komponenten ist

hergestellt und arbeitet einwandfrei. Auch die Funkverbindungen zwischen den Fahrzeugen und dem Zentralrechner, sowie die zwischen den Fahrzeugen und der Referenzstation (DGPS) senden kontinuierlich Signale. Des Weiteren ist die Teststrecke vom bedienenden Personal freigegeben worden und es sind auch keine Probleme, wie beim Status „Testabbruch“ oder „NOTAUS“ definiert, erkennbar. Sind all diese Punkte erfüllt, befindet sich die Testumgebung im normalen Testbetrieb mit definierten Fahrzeugzuständen.

Definierte Fahrzeugzustände:

- Fahrzeug befindet sich im Stillstand
- Fahren gemäß einer vorgegebenen Trajektorie innerhalb der zulässigen Toleranzen
- Ferngesteuertes Fahren von Hand (Bsp.: Fahrzeug in die Parkposition bringen)

Beim normalen Testbetrieb werden also zum Beispiel alle Fahrzeuge per Fernsteuerung auf ihre Startpositionen gefahren und anschließend der Test gestartet. Dabei versuchen alle beteiligten Fahrzeuge (Regler) so gut wie möglich, ihre Vorgabetrajektorien sowohl örtlich wie zeitlich abzufahren. Durch diese räumliche und zeitliche Präzision können den Fahrzeugen beliebig komplexe, fahrbare Manöver vorgegeben werden. Die Trajektorien werden so geplant, dass die Fahrzeuge am Ende der Trajektorie zum Stillstand kommen. Nachdem alle Fahrzeuge ihre Stoppunkte erreicht haben, ist die aktive Sicherheitsumgebung stillgesetzt und die Fahrzeuge können wieder manuell auf ihre Ausgangspositionen gebracht werden.

Um einen „normalen Testbetrieb“ abubrechen, wird in den Betriebszustand „Testabbruch“ gewechselt. Dieser Wechsel kann automatisch bei einem Fehler oder durch den Anlagenleiter erfolgen.

4.2.2 Betriebszustand: Testabbruch

Beim Betriebszustand „Testabbruch“ erfolgt ein geplantes Stillsetzen der Fahrzeuge, basierend auf unkritischen, vorher definierten Trajektorien. Dies ist notwendig, wenn durch Systemeinschränkungen (Toleranz Fehler, etc.) die geforderte Präzision des Systems nicht mehr gewährleistet ist, die einzelnen Systeme (Lenkroboter, Steuerrechner, etc.) aber noch steuerbar sind. Der Verlauf der unkritischen Trajektorien ergibt sich aus den unkritischen

Bereichen, die in der Vorplanung definiert werden müssen. Genauere Überlegungen zum Thema „Testabbruch“ und den dabei auszuführenden Manövern folgen in Kapitel 4.3.

Da Testabbrüche im Bereich des regulären Betriebs der Anlage liegen, soll es dabei natürlich weder zu kritischen Zuständen noch zu Beschädigungen kommen. Dennoch liegt die Priorität bei Testabbrüchen darin, Kollisionen der beteiligten Fahrzeuge und das Verlassen der Teststrecke zu vermeiden und somit vor allem die verwendete Hardware nicht zu beschädigen. Prinzipiell gilt es dabei, die Fahrzeuge möglichst schnell zum Stillstand zu bringen. Es kann jedoch durchaus sinnvoll sein, ein Fahrzeug noch kurz zu beschleunigen, um es schneller aus dem Gefahrenbereich zu bringen, bevor es anschließend abgebremst wird. Typischerweise besteht ein Abbruch lediglich aus gesteuerten Manövern und ist somit bereits in der Planung weitgehend zu berücksichtigen.

Fehler die zu einem Testabbruch führen können:

- Toleranz Fehler (Ort-Zeit)
- Zu große Unschärfe des Positionsmesssystems
- Fehler in der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zentralrechner
- Fehler in der Kommunikation zwischen DGPS und Fahrzeug
- Warnung Status Fahrzeug (Öldruckkontrolle, Kühlflüssigkeitstemperatur, etc.)
- Beobachter löst Testabbruch aus (Bsp.: Kameras nicht aktiv)

Der „Testabbruch“ selbst wird weiterhin von der Regelung überwacht und erfolgt ausschließlich definiert. Tritt nun auch dabei ein Fehler auf, wechselt das System automatisch in den „NOTAUS“ Status.

4.2.3 Betriebszustand: NOTAUS

Der „NOTAUS“ Status ist notwendig, wenn die Anlagensicherheit nicht mehr durch die übergeordnete Systemregelung sichergestellt werden kann (Bsp.: Ausfall kritischer Komponenten). Auch beim Auftreten unvorhergesehener Schwierigkeiten liegt die Priorität nicht in der Unfallvermeidung, sondern in einem möglichst schnellen Abbau der Energie der Testfahrzeuge. So sollten die Fahrzeuge möglichst schnell zum Stillstand gebracht werden, wenn sich beispielsweise eine Person unvorhergesehen in der Testumgebung befindet. Dabei kann es durch die Bremsung zwar zu Kollisionen kommen, es gibt aber durchaus Situationen,

in denen ein noch beschleunigendes Fahrzeug (Abbruchmaßnahmen gewählt beim Testabbruch) schlimme Folgen nach sich tragen kann.

Gründe für den Wechsel in den Betriebszustand NOTAUS:

- Fehler beim Testabbruch (Fahrzeug befindet sich in einem verbotenen Sektor, etc.)
- Fehler bei Komponenten (Lenk-, Gas-, Bremsroboter, Fahrzeugregler)
- Fehler im Fahrzeug (Bremsdefekt, Motorstillstand, Lenkungsprobleme, etc.)
- NOTAUS durch beobachtendes Personal (unvorhergesehene Probleme, etc.)

Durch die genannten Gründe wechselt die gesamte Testumgebung in den Status NOTAUS. Das bedeutet, alle Fahrzeuge führen eine Vollbremsung über ein zusätzlich im Fahrzeug integriertes, autarkes Notbremssystem und eine Spritsperre aus, um unabhängig von den Fahrzeugkomponenten das Fahrzeug abzubremsen und zum Stillstand bringen zu können. Nach dem vollständigen Stillsetzen der Testumgebung muss jedes Fahrzeug wieder manuell freigeschaltet werden, um die Testumgebung erneut in Betrieb nehmen zu können. Durch diese Maßnahmen soll ein bewusster Umgang mit dem NOTAUS entwickelt werden und zusätzlich ein eventuell versehentliches Wiedereinschalten der Testumgebung verhindert werden. Um eine erhöhte Sicherheit zu bieten, sollte der NOTAUS Status nicht nur über die Standard-Funkverbindung gesendet werden, die NOTAUS Statusmitteilung sollte mittels einer zweiten, unabhängigen Funkverbindung realisiert werden.

4.2.4 Betriebszustand: Physikalische Barriere

Der Wechsel in den „letzten“ Betriebszustand, der gleichzeitig eine Kollision mit der physikalischen Barriere darstellt, erfolgt aufgrund der Bewegung vollautomatisch. Sollte also trotz aller Sicherheitsmaßnahmen (doppelte Kommunikation, Testabbruch, NOTAUS, etc.) das Fahrzeug nicht mehr rechtzeitig zum Stillstand gebracht werden können, muss dafür gesorgt werden, dass das Fahrzeug die Testumgebung keinesfalls verlassen kann.

Ein weiterer Grund für den Einsatz einer physikalischen Barriere ist ein Auftreten eines Fehlers in unmittelbarer Nähe zur physikalischen Umrandung und in Folge dessen ein zu spätes Eingreifen der im Fahrzeug integrierten Sicherheitsmaßnahmen. Dies sollte jedoch in der Planung berücksichtigt und solche Manöver möglichst vermieden werden.

Beispiele möglicher Fehler:

Software: Der Fahrzeugrechner verwechselt aufgrund eines Softwareproblems Bremse und Gas und gibt beispielsweise Vollgas

Hardware: Reifendefekt

4.3 Maßnahmen beim Testabbruch

Ein Sonderfall der möglichen Betriebszustände ist der „Testabbruch“, bei dem ein geplantes Stillsetzen der Fahrzeuge, basierend auf unkritischen Trajektorien erfolgt. Beim Testabbruch können für das gesteuerte Stillsetzen Fahrsequenzen für die Fahrzeuge vorgegeben werden. Neben Bremsen kann auch gelenkt, oder wie bereits erwähnt, sogar kurzfristig beschleunigt, und dadurch ein Fahrzeug am schnellsten aus einem Gefahrenbereich entfernt werden.

Bei vielen Testszenarien kann davon ausgegangen werden, dass beim Testabbruch zu verschiedenen Zeitpunkten immer die gleiche Maßnahme (z.B. Lenken nach links mit gleichzeitigem Bremsen) vom betrachteten Fahrzeug ausgeführt werden muss. Die einzuleitenden Abbruchmaßnahmen der beteiligten Fahrzeuge werden dabei in der Vorplanung definiert und im Testabbruchfall von den beteiligten Fahrzeugen entsprechend ausgeführt. Bei umfangreicheren Szenarien (z.B. kreuzende Fahrbahnen) kann es zur Vermeidung von Kollisionen erforderlich sein, die Abbruchmaßnahmen abhängig von den Fahrzeugpositionen zu gestalten. Da die Regelung die Fahrzeugposition abhängig von der Zeit überwacht, können die Abbruchmaßnahmen entweder abhängig von der Zeit oder von der örtlichen Position in der Vorplanung bestimmt werden. Aus diesem Grund können die Abbruchmaßnahmen für jedes Fahrzeug spezifisch definiert werden. Für die bessere Visualisierung und eine zielführende Planung der Abbruchmaßnahmen wurden sogenannte Auslaufräume definiert. Bei Testabbrüchen sollen die Fahrzeuge in diesen so genannten Auslaufräumen zum Stillstand gebracht werden. Dazu muss sich das Fahrzeug zum Zeitpunkt des Testabbruchs noch nicht im jeweiligen Auslaufräum befinden. Durch die beim Testabbruch eingeleiteten Maßnahmen soll das Fahrzeug definiert in die jeweiligen Auslaufräume gebracht werden.

4.3.1 Beispielszenarien für Abbruchmaßnahmen

Die Abbruchmaßnahmen werden im Folgenden anhand von Beispielen erläutert. Zu diesem Zweck werden für jedes Fahrzeug Auslaufräume definiert. Mit Hilfe dieser Auslaufräume ist es sehr einfach möglich, die Abbruchmaßnahmen einfach und sicher zu planen, beziehungsweise im Notfall auszuführen. Anzumerken ist auch noch, dass es sich nicht um eine komplette Fahrmanöverliste handelt. Ziel ist es, das verwendete Prinzip der Auslaufräume zu erläutern.

In der folgenden Abbildung 11 sind zwei Manöver dargestellt, bei denen beispielsweise automatisierte Fahrzeuge zum Einsatz kommen können. So soll die linke Abbildung eine schnelle Vorbeifahrt des Fahrzeuges 2 an Fahrzeug 1 und die rechte Abbildung ein Fahrmanöver, bei welchem sich das Fahrzeug 2 Fahrzeug 1 im toten Winkel annähert, darstellen. In beiden Fällen kann der Auslaufraum der Fahrzeuge leicht bestimmt werden. Die bei einem Testabbruch eingeleiteten Abbruchmaßnahmen (lenken in Pfeilrichtung plus bremsen) bleiben für den gesamten Test gleich.

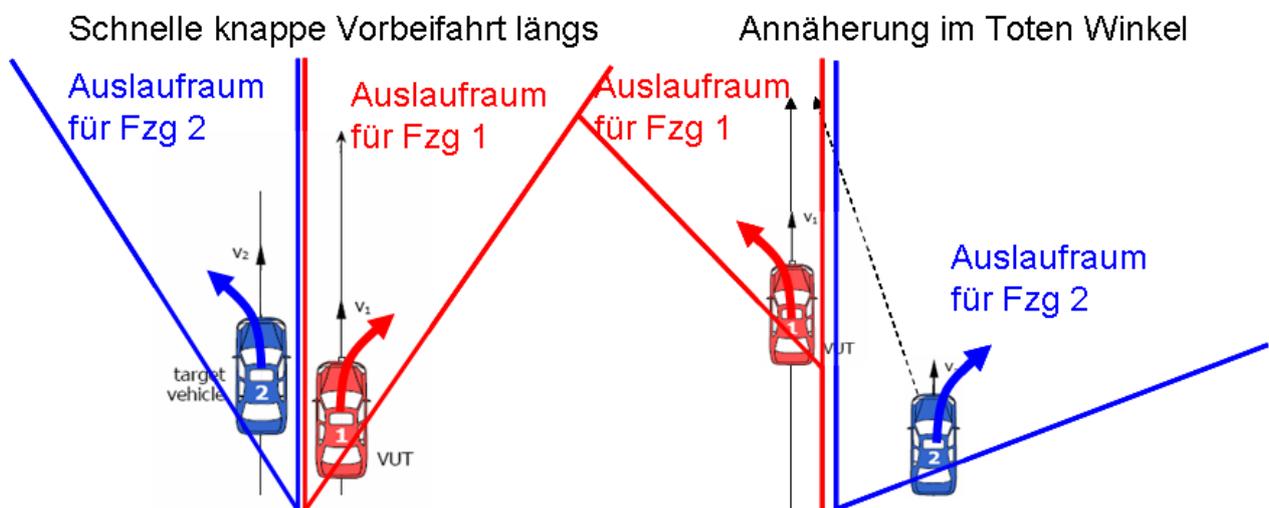


Abbildung 11: Abbruchmaßnahmen – Szenarien knappe Vorbeifahrt und Annäherung im toten Winkel

Als zweites Szenario wird die knappe Vorbeifahrt (z.B. 20 Zentimeter) an stehenden Hindernissen analysiert. Auch bei diesem Szenario (Abbildung 12) bleiben die Abbruchmaßnahmen während des Tests ident. Der Auslaufraum des roten Fahrzeugs (Fahrzeug 1) passt sich in diesem Fall an den vorgegebenen Kurs an. Es wäre auch möglich, den Auslaufraum des roten Fahrzeuges nur links des blauen (Fahrzeug 2) zu definieren

(gestrichelte Linie), da sich ja per Definition das Fahrzeug bei Beginn des Testabbruches nicht im Auslaufraum befinden muss.

Knappe Vorbeifahrt an stehendem Hindernis

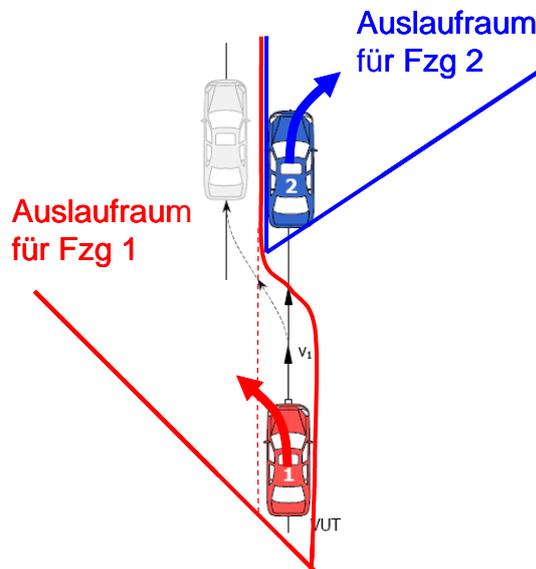


Abbildung 12: Abbruchmaßnahmen – knappe Vorbeifahrt an stehendem Hindernis

Durch eine leichte Veränderung dieses Szenarios, von einem stillstehenden und einem bewegten Fahrzeug zu zwei bewegten Fahrzeugen, ergibt sich ein weiteres mögliches Szenario. Da es sich bei den Auslaufräumen um „Zielorte“ handelt, ist es nicht notwendig, die Auslaufräume „mitzubewegen“. In Abbildung 13 überholt das blaue Fahrzeug das rote und schert vor ihm ein. Auch hier ist es möglich, die Auslaufräume im Vorfeld zu definieren. Dabei sieht man, dass sich das rote Fahrzeug nicht in seinem zugehörigen Auslaufraum befindet. Auch das blaue Fahrzeug wird zu einem späteren Zeitpunkt (nach dem Einscheren) seinen Auslaufraum verlassen. Im Fall eines Testabbruchs werden jedoch beide Fahrzeuge durch Lenken nach rechts (Fahrzeug 1) bzw. links wieder in ihre Auslaufräume geführt und dort zum Stillstand gebracht.

Auch bei diesem Szenario können die Auslaufräume eindeutig definiert werden. Es befinden sich die Fahrzeuge jedoch in diesem Szenario nicht immer innerhalb ihrer Auslaufräume. Beim Testabbruch wird hingegen wieder versucht, die Auslaufräume durch die getroffenen Abbruchmaßnahmen definiert zu erreichen.

Beim „Kreuzungsszenario knappe Vorbeifahrt“ (s. Abbildung 15) fahren zwei Fahrzeuge mit beispielsweise 50 km/h auf eine Kreuzung zu und passieren diese ohne eingeleitete Maßnahmen in einem geringen Abstand. Dieses Szenario kann zum Beispiel für Sensortests (Umgebungserkennung) genutzt werden. Bei diesem Szenario ist es sinnvoll, in Abhängigkeit der Zeit (Simulationszeit t_0 bis t_2 , Abbildung 15; Simulationszeit nach t_2 , Abbildung 16) bzw. der Fahrzeugposition, unterschiedliche Abbruchmaßnahmen und dadurch unterschiedliche Auslaufräume für ein Fahrzeug zu definieren.

Zum Zeitpunkt t_1 wird beim Test die Endgeschwindigkeit (50 km/h) erreicht, der Teststart erfolgt bei t_0 . Soll nun ein Testabbruch im Zeitbereich t_0 - t_2 (0-1.45 s) erfolgen, so können die dazugehörigen Auslaufräume für diesen Zeitbereich definiert werden. Die eingeleiteten Abbruchmaßnahmen sind für diesen Bereich für das rote Fahrzeug nach links lenken und bremsen und für das blaue Fahrzeug nach rechts lenken und bremsen.

Abbildung 15 stellt diese Abbruchmaßnahmen zu einem späten Zeitpunkt dar. Das blaue und rote Fahrzeug befinden sich in der Abbildung bereits im Stillstand, somit in der Endlage. Man sieht sehr schön, dass sich die beiden Fahrzeuge bereits gefährlich annähern.

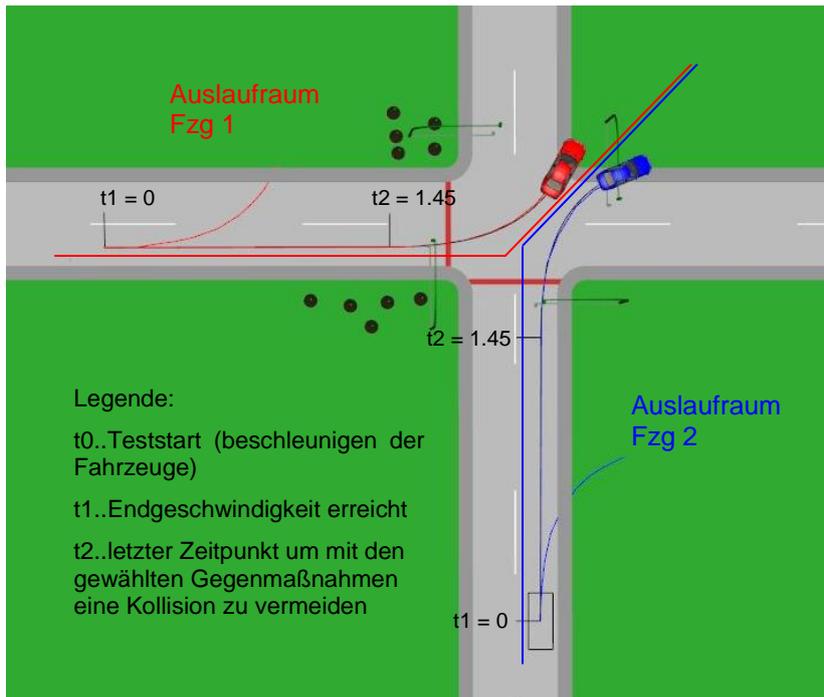


Abbildung 15: Abbruchmaßnahmen bei Kreuzungsszenario knappe Vorbeifahrt (1)

Erfolgt jedoch ein Testabbruch nach der Zeit t_2 (1.45s), kommt es bei den zuvor festgelegten Abbruchmaßnahmen zur Kollision der Fahrzeuge. Aufgrund dessen müssen die Auslaufräume für die Zeit nach t_2 neu gewählt werden (s. Abbildung 16).

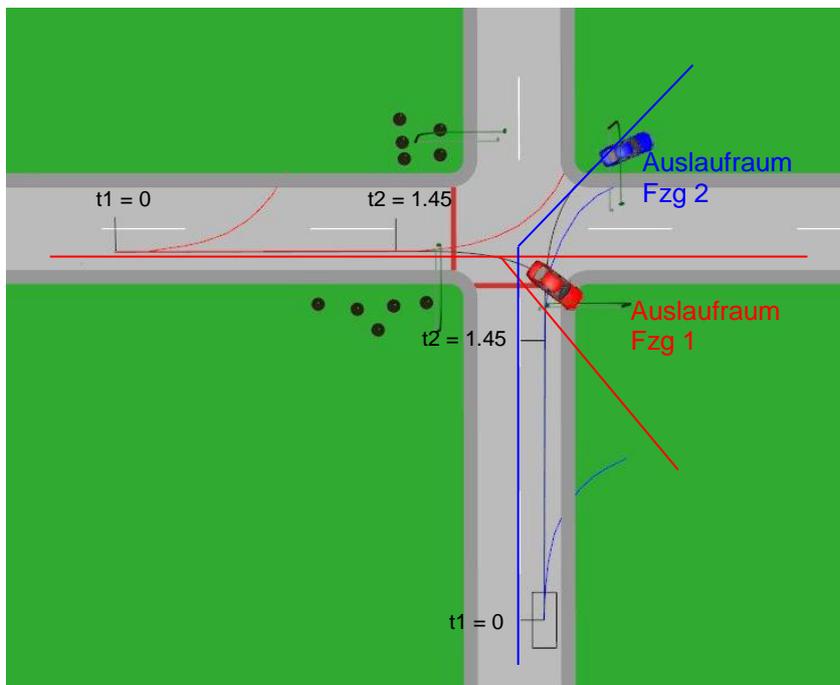


Abbildung 16: Abbruchmaßnahmen bei Kreuzungsszenario knappe Vorbeifahrt (2)

Um die Kollision bei einem Testabbruch nach t_2 zu vermeiden, sollte das blaue Fahrzeug kurzfristig beschleunigen und nach rechts lenken, während das rote Fahrzeug bremst und ebenfalls nach rechts lenkt (Abbildung 16). So können beide Fahrzeuge die Kreuzung passieren und durch das Beschleunigen kann der Abstand zwischen den Fahrzeugen sogar noch vergrößert werden. Nachdem das blaue Fahrzeug seinen Auslaufräum erreicht hat, kann das Abbremsen bis zum Stillstand erfolgen.

Bei diesem Szenario ist es also notwendig, die Auslaufräume, bzw. die Abbruchmaßnahmen an die Fahrzeugposition und die damit verbundene Zeit anzupassen. Erfolgt keine Anpassung, kommt es bei einem Testabbruch eventuell zur Kollision. Dies soll aber durch die Definition der Abbruchmaßnahmen verhindert werden.

4.3.2 Definition der Auslaufräume

Basierend auf den zuvor durchdachten Szenarien, sollten bei der Festlegung der Auslaufräume mehrere Punkte berücksichtigt werden:

- Platzbedarf für das Abbremsen des Fahrzeug bis zum Stillstand:
Hierbei gilt es vor allem zu beachten, dass ein exakter Platzbedarf, beziehungsweise Bremsweg, kaum zu ermitteln ist. Gerade der Bremsvorgang ist von sehr vielen externen Faktoren (Reibwert, Reifen, etc.) abhängig. Deshalb sollte bei der Auslegung des Platzbedarfs immer von einem maximalen Bremsweg ausgegangen werden.
- Beachten der sicheren Bereiche (Steuerstand, etc.):
Abbruchmaßnahmen sollten auch bei ausreichendem Platz nicht so gewählt werden, dass die Fahrzeuge sich auf diese Bereiche im Abbruchfall zubewegen.
- Bei sich verändernden Auslaufräumen:
Genauere Festlegung der Zeitpunkte für den Wechsel zum nächsten Auslaufräum.
- Auslaufräume (für eine Zeitspanne) dürfen sich nicht überschneiden.
- In den Auslaufräumen dürfen sich keine Hindernisse (Steuerstand, Messtechnik, etc.) befinden.

Im Zusammenhang mit den Auslaufräumen sollte des Weiteren überlegt werden, ob diese schnell (beschleunigen), normal (gleichbleibende Geschwindigkeit) oder langsam (bremsen) erreicht werden sollen.

Mit der Festlegung der Auslaufräume ergeben sich die dazugehörigen Abbruchmaßnahmen. Diese können abhängig von Zeit und Ort erstellt werden. Dadurch ist es möglich, sehr einfach (wenige Kombinationen) und übersichtlich die Sicherheitsmaßnahmen während der Versuchsplanung zu definieren, um einen sicheren Betrieb der Testumgebung für das koordinierte, automatisierte Fahren von Fahrzeugen zu ermöglichen.

4.3.3 Mögliche Abbruchmaßnahmen

Bei den Überlegungen zum Thema Abbruchmaßnahmen stellt sich natürlich die Frage der Realisierung der Maßnahmen im Fahrzeug. Bei den Abbruchmaßnahmen handelt es sich um Steuereingriffe und nicht um eine Regelung, da Fehler im Steuerrechner möglichst keinen Einfluss auf die Abbruchsequenzen haben sollen.

Basierend auf diesen Überlegungen gilt es auch, die Frage nach der möglichen oder erlaubten Komplexität der vorzugebenden Abbruchmaßnahmen zu klären. Grundsätzlich können Abbruchmaßnahmen durch Lenk-, Brems- und Beschleunigungsvorgänge realisiert werden. Zwar können durch beliebiges Aneinanderreihen solcher Sequenzen auch die umfangreichsten Testabbrüche realisiert werden, doch gilt es, Fahrzeuge im Testabbruchfall möglichst einfach und sicher zum Stillstand zu bringen. Daher erscheint es sinnvoll, Abbruchmaßnahmen aus maximal zwei Sequenzen zu realisieren. Diese können aus einem Lenk- und einem Pedalmanöver bestehen. Bei der Verwendung lediglich einer Sequenz besteht diese selbstverständlich aus einem Lenk- und einem Bremsmanöver um das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen. Werden jedoch zwei Sequenzen verwendet, kann die erste Sequenz aus Lenken und Beschleunigen und erst die zweite aus einem weiteren Lenkmanöver und Bremsen bestehen. Da der aktuelle Lenkwinkel des Fahrzeugs nicht immer bekannt ist und sich im Zuge einer Kurvenfahrt beispielsweise verändert, kann es durchaus gewollt sein, dass das Fahrzeug beim Abbruch den Lenkwinkel konstant hält. Es sollten also im Wesentlichen zwei Arten von Abbruchmaßnahmen für eine einfache und effiziente Testabbruchplanung, abhängig von der gewählten Steuerung der Lenkung, zur Verfügung stehen. Einmal die Variante bei der bis zu zwei unabhängige Lenkeinschläge dem Fahrzeug vorgegeben werden können und zum Zweiten die Variante mit einer Fixierung des aktuell anliegenden Lenkwinkels. Um die Definition von Abbruchmaßnahmen möglichst sicher zu gestalten, müssen die Zeiträume für die Sequenzen noch zusätzlich eingeschränkt werden. So stellt beispielsweise die Möglichkeit, die Beschleunigungssequenz beliebig lang vorzugeben, ein

definitives Problem dar. Aus diesem Grund wird hier eine maximal zulässige Zeitdauer von wenigen Sekunden (2 s – 3 s) hinterlegt werden. Auch die Bremssequenz darf nur so gewählt werden, dass das Fahrzeug auch zum Stillstand kommen kann. Bei der Bremssequenz sollte des Weiteren bedacht werden, dass auch eine Bremsleistung vorgegeben werden muss die das Fahrzeug in einem kurzen Zeitraum zum Stillstand bringt. Auch diese Punkte müssen durch minimal vorgebbare Verzögerungen bedacht werden. Werden zwei Sequenzen verwendet, können Ausweichräume sehr einfach und effizient erreicht und das Fahrzeug dort zum Stillstand gebracht werden.

Durch die Definition und anschließender Simulation der Abbruchmaßnahmen, im entwickelten Testprogramm, kann ein sicherer Betrieb der Teststrecke gewährleistet werden. Im Folgenden sollen sowohl das entwickelte Simulations- als auch das Planungsprogramm näher beschrieben werden.

5 Planung von Tests mit koordiniert automatisiert fahrenden Fahrzeugen

Neben der eigentlichen Testdurchführung und den Sicherheitsaspekten ist auch eine einfache und effiziente Testplanung – gerade bei komplexen Szenarien – von großer Bedeutung. Der geplante Test sollte sich der Realität bestmöglich annähern und eine objektive Beurteilung der Durchführbarkeit des Szenarios geben. Dabei sollte einerseits überprüft werden, ob das Fahrzeug aufgrund seiner fahrdynamischen Eigenschaften der Solltrajektorie folgen kann, andererseits sollen im Vorfeld des Versuchs auch sicherheitskritische Stellen gefunden und auf deren Gefahrenpotential hin untersucht werden. Für diese werden, wie schon beschrieben, genau definierte Abbruchmaßnahmen vorgegeben. Die leichte Bedienbarkeit und der flüssige Workflow im gesamten Versuchsablauf sind Voraussetzung dafür, dass eine solch komplexe Versuchsplanung in der Praxis effizient eingesetzt werden kann.

Aufgrund dieser Anforderungen wurde eine Planungssoftware entwickelt. Diese Software ist grundsätzlich eine Erweiterung des Unfallrekonstruktionsprogramms PC-Crash [40, 1996]. PC-Crash bietet die Möglichkeit, fahrdynamische Simulationen von Fahrzeugen durch numerische Integration der Bewegungsgleichungen auf Basis eines Zweispurmodells durchzuführen.

5.1 Planung von Testszenarien mit PC-Crash

Das Mehrkörpersimulationsprogramm PC-Crash wurde für die Rekonstruktion von Realunfällen entwickelt und wird weltweit von über 2500 Anwendern genutzt. Die Anwender finden sich in den Bereichen des Sachverständigenwesens, der Exekutive und der Automobilindustrie. PC-Crash [41] zeichnet sich unter anderem durch geringe Simulationszeiten aus. Dieser Umstand ist wichtig, da es dadurch leicht möglich ist, viele Variationen eines Unfalls in einer annehmbaren Zeit zu simulieren.

Aufgrund der umfangreichen, in das Programm integrierten mathematischen Modelle lassen sich verschiedenste Szenarien sehr gut rekonstruieren und somit Aussagen über den Unfallhergang treffen. Dabei können neben einer Vielzahl von Fahrzeugparametern

(Gasstellung, Federcharakteristik, etc.) auch „Umgebungsparameter“ (Fahrbahn, Hindernisse, etc.) definiert werden.

Durch diese Vielzahl an einstellbaren Parametern kann das Fahrzeugverhalten sehr gut abgebildet werden. Dadurch ist diese Software für die grundsätzliche Planungsphase von Testszenarien für eine aktive Sicherheitsumgebung sehr gut geeignet.

Ziel dieses Kapitel ist es, die Funktionalität von PC-Crash in Bezug auf die Grundplanung von Solltrajektorien darzustellen. Zu diesem Zweck werden einige Grundfunktionalitäten des Programms kurz beschrieben.

5.1.1 Definitionsmöglichkeiten für die Fahrbahn

PC-Crash erlaubt die Erzeugung von vordefinierten, parametrisierten Fahrbahnen und Hindernissen (Bäume, Häuser, etc.) wie in Abbildung 17 links dargestellt. Des Weiteren ist es sehr einfach möglich, beliebige Bilder in die Darstellung der Simulationsergebnisse einzubinden (Abbildung 17, rechts). So können beispielsweise Satellitenfotos von realen Teststrecken virtuell überlagert werden, um die Visualisierung des simulierten Testszenarios möglichst realistisch zu gestalten.

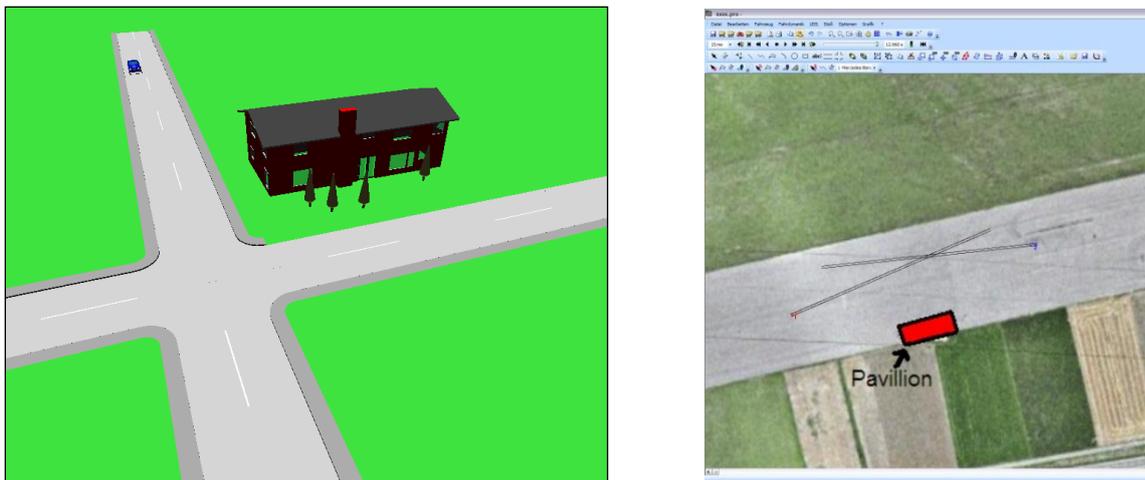


Abbildung 17: PC-Crash 3D und 2D Ansicht

Im 2D Fenster lassen sich dabei die verschiedenen Szenarien übersichtlich darstellen und hinsichtlich des gewünschten Effekts überprüfen. Eine weitere Möglichkeit von PC-Crash ist die Darstellung im 3D Fenster, wodurch auch beispielsweise der Blickwinkel eines Fahrers

(Einfluss einer Sichtbehinderung durch ein Gebäude wie in Abbildung 17) überprüft werden kann. Durch die optische Visualisierung von PC-Crash ist also eine umfangreiche, einfache, visuelle Überprüfung der Szenarien möglich.

5.1.2 Fahrzeuge

Im Programm PC-Crash ist eine Datenbank integriert, welche fast alle derzeit gängigen Kraftfahrzeuge berücksichtigt. Diese Datenbank wird jedes Jahr erweitert und enthält alle relevanten technischen Daten der entsprechenden Kraftfahrzeuge. Die in der Datenbank enthaltenen Werte können entweder direkt übernommen oder aber auch verändert werden. Dadurch ist es auch möglich, beliebige oder auch zukünftige Fahrzeuge zu „generieren“. In der vorhandenen Fahrzeugdatenbank sind unter anderem folgenden Parameter definiert:

- **Geometrie:**
Masse, Schwerpunktslage, Spurweite, etc.
- **Federung:**
Neben einer sehr einfachen Grobeinstellungsmöglichkeit (hart, mittel, weich) besteht auch die Möglichkeit einzelne Parameter, wie den Federweg zu ändern.
- **Karosserieform:**
Hier besteht die Möglichkeit, ein 3D Modell des jeweiligen Fahrzeuges zu importieren oder über Parameter die gewünschte Form anzunähern.
- **Bremskraftverteilung:**
Zwischen Vorder- und Hinterachse, Verwendung von ABS – inklusive Vorgabe der Zykluszeiten.

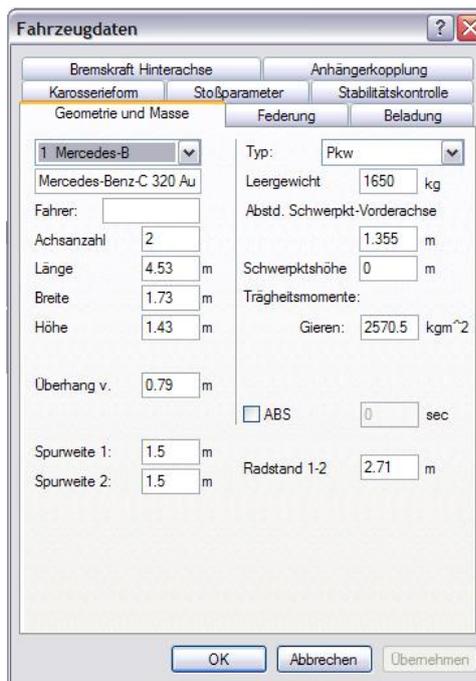


Abbildung 18: Einstellmöglichkeiten der Fahrzeugparameter

In Abbildung 18 ist das Optionenfenster für die Fahrzeugdaten in PC-Crash abgebildet.

- **Reifenmodell:**

Neben den primären Fahrzeugdaten sind in PC-Crash auch Reifenmodelle integriert, um den Rad-Bodenkontakt möglichst realistisch darstellen zu können. Selbstverständlich kann die Reifendimension beliebig gewählt werden.

- **Antriebsparameter:**

Des Weiteren können auch Parameter des Motors, wie die Getriebeübersetzung, mit Hilfe des Programms PC-Crash abgebildet werden. Bei Bedarf ist es sogar möglich, den genauen Momentenverlauf und die Schaltzeitpunkte vorzugeben.

- **Luftwiderstand:**

Wie in Abbildung 19 dargestellt, ist es möglich, den Luftwiderstand in den Simulationen zu berücksichtigen. Dabei wird nicht nur der Luftwiderstand in Fahrtrichtung berücksichtigt, sondern es kann auch Seitenwind berücksichtigt werden.



Abbildung 19: Luftwiderstand

All diese Modelle und Parameter sind die ideale Voraussetzung, um Tests in einer aktiven Sicherheitsumgebung realistisch und sehr einfach planen zu können.

5.1.3 Erstellen von Szenarien

Gewünschte Szenarien können in PC-Crash auf verschiedenste Art und Weise definiert werden. Es ist beispielsweise möglich, Szenarien mittels so genannter Sequenzen (Abbildung 20) vorzugeben. Eine Sequenz könnte beispielsweise eine Beschleunigungsphase (Abbildung 21) des Kraftfahrzeuges sein. Für dieses Beispiel wird einfach eine konstante Beschleunigung für eine vorgegebene Zeit definiert. Wenn anschließend mehrere Sequenzen entsprechend kombiniert werden, erhält man das gewünschte Gesamtszenario. Die Eingabe der Sequenzdauer kann dabei sekunden- oder meterbasiert erfolgen. Eine weitere Möglichkeit den zu fahrenden Weg zu definieren, ist die Möglichkeit der Vorgabe von Spurpunkten (Abbildung 22). Dadurch wird zwar der zu fahrende Weg vorgegeben, es ist jedoch trotzdem notwendig, hinsichtlich der Geschwindigkeit, Sequenzen zu erstellen.

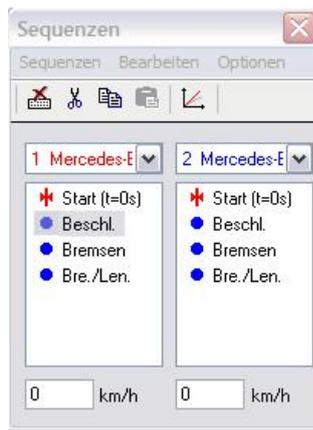


Abbildung 20: Sequenzfeld



Abbildung 21: Sequenz Beschleunigen

Typischerweise werden die gewünschten Szenarien ausgehend vom Startpunkt definiert. Mit PC-Crash ist jedoch auch eine so genannte Rückwärtsrechnung, also die Planung, ausgehend von einem zu definierenden Endpunkt, möglich. Dies findet vor allem bei der Unfallrekonstruktion Anwendung, da dabei meist die Endlagen der Fahrzeuge bekannt sind. Über die Ermittlung weiterer Parameter, wie beispielsweise der Verzögerung, ist es dann möglich auf die Anfangsgeschwindigkeit zu schließen.

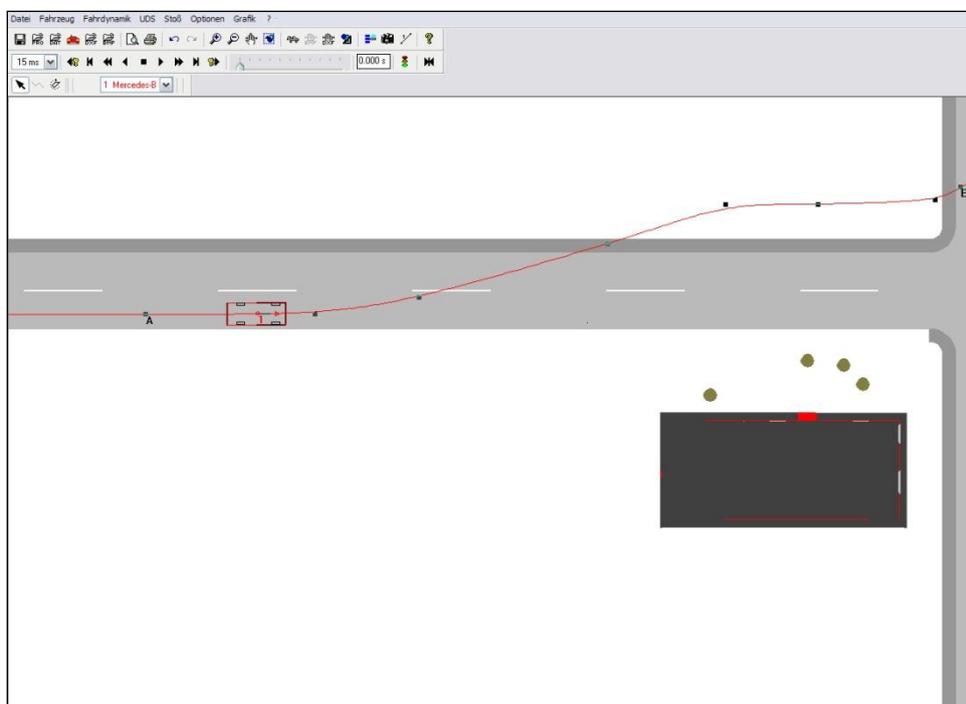


Abbildung 22: Planung mittels Spurpunkten

Durch die Vielzahl mathematischer Modelle, die im Hintergrund die Simulationsdaten berechnen, ist eine sehr genaue theoretische Szenarienplanung möglich. Nur durch die

Verwendung eines Programms, welches sowohl die Fahrzeug – als auch die Fahrbahnparameter berücksichtigt, ist eine realistische Planung durchführbar.

5.2 Das Programm Testcenter

Zwar sind zum aktuellen Zeitpunkt mehrere Simulationsprogramme für realistische fahrdynamische Manöver vorhanden, doch ist keines in der Lage, eine umfangreiche Szenarien- und Sicherheitsplanung zu gewährleisten. Deshalb wurde basierend auf dem Programm PC-Crash das Programm Testcenter entwickelt, welches die in PC-Crash definierten Szenarien vollautomatisch auf ihre Durchführbarkeit hin überprüft. Des Weiteren dient es der Planung und Überprüfung der Abbruchmaßnahmen, da auch diese einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit der Teststrecke (Kollisionsfreiheit auch beim Testabbruch) haben. Ebenso ist eine vollautomatische Berichterstellung integriert, um auch eine effiziente Dokumentation zu ermöglichen.

Der grundsätzliche Simulationsablauf ist in Abbildung 23 dargestellt. Nach der Auswahl des Testszenarios wird dieses in PC-Crash erstellt und simuliert. Abweichungen von der Solltrajektorie infolge von fahrdynamischen Eigenschaften sind in der Szenariensimulation erkennbar. Auch ist es in diesem Schritt möglich, die Fahrzeugtrajektorien zeitlich derart abzustimmen, dass das gewünschte Szenario kollisionsfrei nachgestellt werden kann.

Die Konfigurationsparameter dieser Szenariensimulation bilden die Basis für die Planungssoftware, die in einem ersten Schritt die sicherheitskritischen Bereiche des Testszenarios ermittelt. Zu diesem Zweck werden für jeden Zeitschritt die Fahrzeugabstände zueinander bestimmt. Die Bereiche mit den minimalen Abständen sind per Definition die sicherheitskritischsten, für welche die Auslaufräume und die Abbruchmaßnahmen (Fahrsequenz mit Bremspedalstellung, Lenkradeinschlag, etc.) definiert werden. Des Weiteren werden die typischen Bremswege aller Objekte während der Simulation berechnet und aus den Abstandsdaten und mittleren Bremswegen mögliche kritische Bereiche aufgezeigt. Nach der Definition der Abbruchmaßnahmen für die kritischen Bereiche kann der Kollisionscheck (vollautomatische Simulation des gesamten Szenarios und der Abbruchmaßnahmen) durchgeführt werden. Die Planungssoftware veranlasst dazu die automatische Durchführungen aller Simulationen. So wird beispielsweise die Basissimulation bis zum Zeitpunkt eines fiktiven Testabbruchzeitpunkts simuliert. Ab diesem Zeitpunkt

werden die Fahrzeugmanöver entsprechend der vorher definierten Abbruchsequenzen weiter berechnet. Treten bei dieser Simulation keinerlei Kollisionen auf, sollte im Anschluss noch eine optische Simulation durchgeführt werden. Dabei werden die gefahrenen Spuren eingezeichnet, somit können weitere kritische Bereiche noch visuell erfasst werden. Sollten noch Probleme erkannt werden, müssen die Abbruchmaßnahmen entsprechend angepasst werden, andernfalls können die Spurdaten und die Abbruchmaßnahmen in den Vorlagefiles für die Fahrzeuge gespeichert werden.

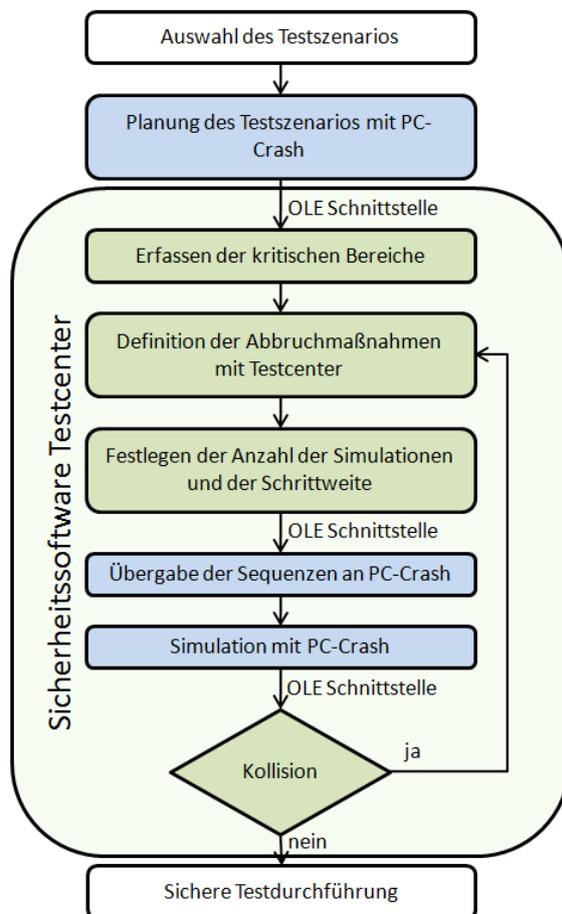


Abbildung 23: Prinzipdarstellung der Funktionsweise der entwickelten Planungssoftware

Bei der Simulation der Trajektorien gilt es noch, die Unterschiede zwischen dem Import von PMC Files und der Verwendung von PC-Crash Projekten zu beachten. Bei PC-Crash Projekten wird auch die dynamische Durchführbarkeit (wie oben beschrieben), beispielsweise die maximale Kurvengeschwindigkeit, berücksichtigt. Beim Import eines PMC- Files wird davon ausgegangen, dass die Manöver bereits in real gefahren oder bereits mit PC-Crash geplant und abgespeichert wurden und somit realisierbar sind. Es wird also nicht mehr überprüft ob der Test in der vorliegenden Konfiguration überhaupt dynamisch fahrbar ist.

Im Folgenden sollen Möglichkeiten und Funktionsweise des selbst entwickelten Programmes Testcenter aufgezeigt werden.

5.2.1 PC-Crash Datei öffnen

Hiermit können PC-Crash Files als Grundlage für die Simulationen mit dem Programm Testcenter, gewählt werden. Dabei gilt es zu entscheiden, ob das aktuelle PC-Crash Projekt (Testszenario) verwendet oder ein gespeichertes Projekt (Testszenario) gestartet werden soll. Das Projekt wird bereits zu diesem Zeitpunkt auf verschiedene Bedingungen hin überprüft. Beispielsweise muss sich mindestens ein Objekt im Projekt befinden und die Testdauer darf nicht Null betragen. Sollten diese Bedingungen erfüllt sein, wird das Projekt importiert, anderenfalls wird ein Fehler ausgegeben. Das PC-Crash Projekt kann jederzeit verändert, gespeichert, geladen und vollständig simuliert werden.

5.2.2 PMC Files Importieren

Der Dateityp PMC wird verwendet, um Pfaddaten und Abbruchmaßnahmen an die koordiniert automatisiert fahrenden Fahrzeuge zu übergeben. Dieser Dateityp wurde in Kooperation mit der Daimler AG und Anthony best dynamics festgelegt, um auch mit anderer Software Tests (jedoch nicht die Testabbruchmaßnahmen) planen und simulieren zu können. Die Spurdaten werden dabei meterbasiert abgelegt. Um präzise räumliche wie zeitliche Tests durchzuführen, werden zu den Meterpunkten jeweils die Zeitpunkte und die genauen Positionen im meterbasierten X - Y Koordinatensystem abgespeichert.

Da hierbei kein Original PC-Crash Objekt File verwendet wird, findet sich der Menüpunkt „PMC-Datei“ unter „Datei –Importieren“ (Abbildung 24). Hierbei gilt es, alle verwendeten Parameter möglichst genau einzugeben, um anschließend eine aussagekräftige Sicherheitssimulation durchführen zu können. Es können nur Files importiert werden bei denen die Daten in ein Meter Schritten vorliegen!



Abbildung 24: Import PMC Datei

Besonders zu beachten ist, dass Szenarien, die importiert wurden, nicht auf ihre dynamische Durchführbarkeit hin überprüft werden können. Hier werden nur die Abbruchmaßnahmen dynamisch simuliert. Des Weiteren können keine Veränderungen der Trajektorien der Objekte vorgenommen, beziehungsweise in weiterer Folge dann gespeichert werden. Es ist also nur möglich die Abbruchmaßnahmen anzupassen.

5.2.3 *PMC Datei exportieren*

Über den Menüpunkt „Datei – Exportieren – PMC-Dateien“ können Trajektorien und Abbruchmaßnahmen aller im PC-Crash Projekt befindlichen Objekte in PMC Files exportiert werden.

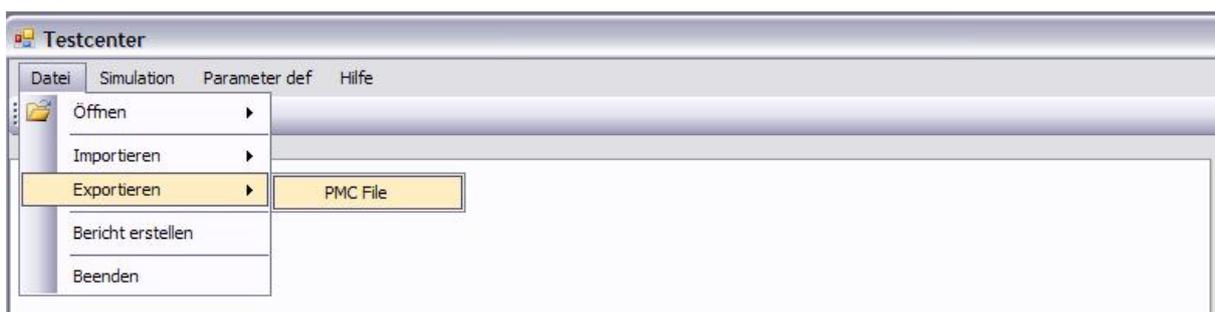


Abbildung 25: PMC Dateien exportieren

Wurde das Testszenario mit PC-Crash erstellt, werden die Trajektorien in ein Meter Schritten in das PMC Format übergeführt. Wurde hingegen ein bereits existierendes PMC File als Grundlage für die Simulationen ausgewählt, werden die Trajektoriendaten unverändert in das neu erstellte File gespeichert. Lediglich Änderungen bei den Abbruchmaßnahmen werden übernommen. Beim Speichern erfolgt ebenso die Berücksichtigung der im Testcenter

definierten Brems- und Lenkparameter. Die Abbruchmaßnahmen werden so umgerechnet, dass sie im Abbruchfall zur gewünschten Pedal- bzw. Lenkstellung führen.

5.2.4 Bericht erstellen

Mit Hilfe des Berichterstellungstools wird ein automatisierter Testbericht mit allen durchgeführten Tests und den verwendeten Abbruchmaßnahmen in Word 2003 beziehungsweise Word 2007 / Word 2010 erstellt.

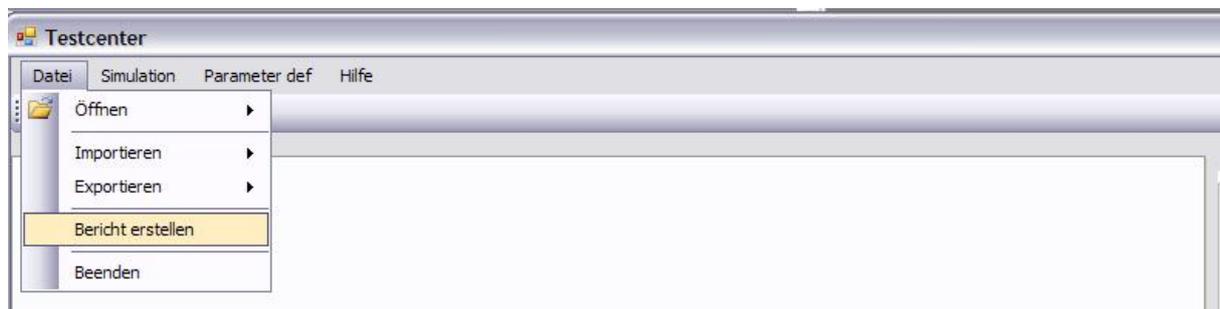


Abbildung 26: Bericht erstellen

Durch den Befehl „Bericht erstellen“ (Abbildung 26) wird im Hintergrund automatisch eine Berichtvorlage (in Word) gestartet, in die alle definierten Sicherheitsparameter und Simulationen automatisch eingetragen werden. Damit ist eine vollständige Dokumentation der vor dem Realtest durchgeführten Simulationen und der zugehörigen Ergebnisse möglich.

5.2.5 Minimalabstandsberechnung

In einer ersten Simulation wird das gewünschte Szenario grob beurteilt. Dieses Tool hat den Vorteil schnell und in sehr kurzer Zeit einen Überblick über das Szenario liefern zu können (s. Abbildung 27). Für diese erste Abschätzung überprüft das Grobabschätzungstool den Schwerpunktsabstand zwischen den im Szenario befindlichen Objekten. Dabei werden neben den Abständen zwischen den Fahrzeugen auch die Abstände zwischen Fahrzeugen und anderen Objekten (z.B. Dummy, Wand) angezeigt. Ausgegeben werden die jeweiligen minimalen Abstände und die dazugehörigen Simulationszeitpunkte aller in der Simulation befindlichen Objekte.

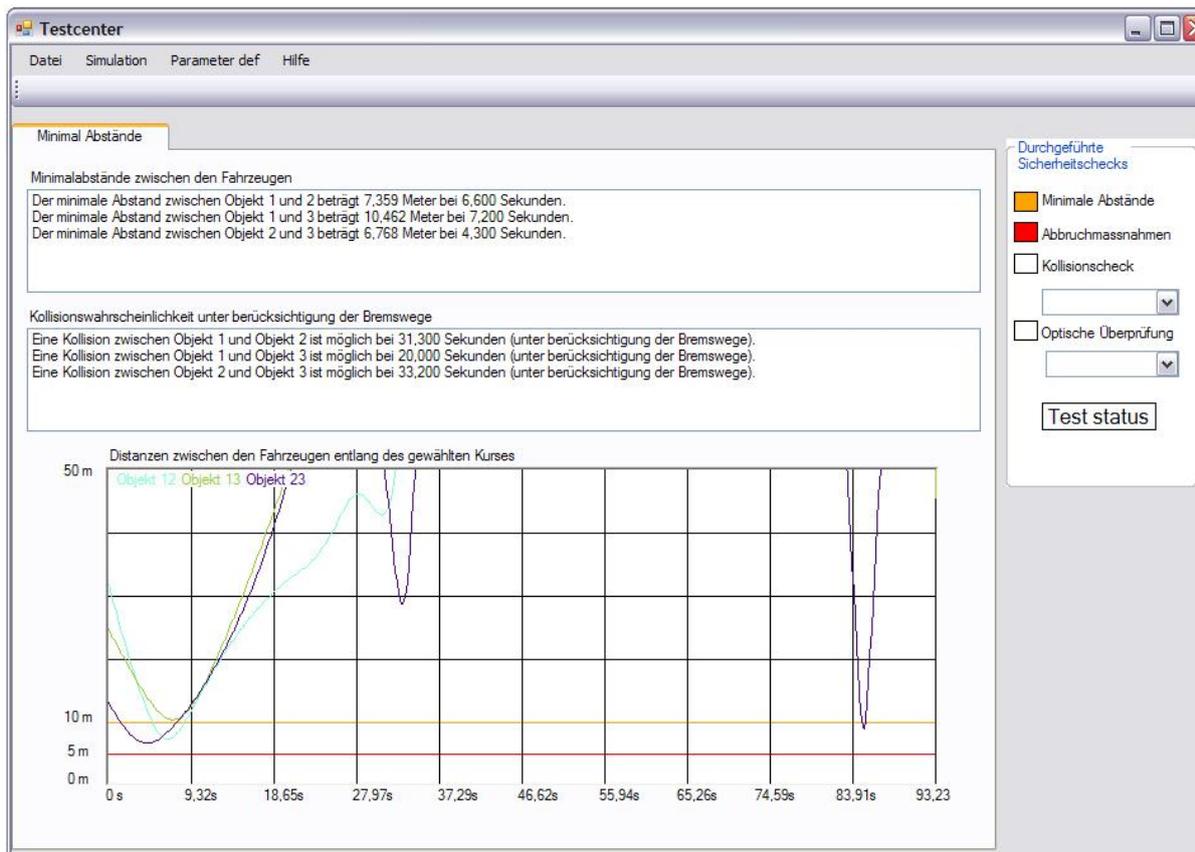


Abbildung 27: Minimal Abstände

Somit kann bereits nach dieser ersten Grobabschätzung eine Aussage getroffen werden, ob der Test (nicht der Testabbruch) unter Berücksichtigung der gewünschten Mindestabstände durchführbar ist. Im angezeigten Diagramm sind nochmals die Abstände über die Zeit dargestellt. Sind die minimalen Abstände zwischen den Fahrzeugen über zehn Meter, wird im rechten Bereich (Durchgeführte Sicherheitschecks) die Farbe Grün bei „Minimale Abstände“ eingetragen, bei fünf bis zehn Metern Orange und unter fünf Metern Rot. Diese Farben sind frei definiert worden. Da ein Fahrzeug aber etwa 5 Meter lang ist, könnte ein Schwerpunktsabstand von 5 Metern bereits eine Kollision (Frontal- oder Heckcrash) bedeuten. Beträgt die Annäherung entlang eines Kurses immer über 5 Meter so ist, zumindest immer ein Mindestabstand vorhanden. Kommt es jedoch zu leichten Abweichungen zwischen den Soll- und Isttrajektorien der Fahrzeuge, kann es auch hier noch leicht zu einer Kollision kommen. Im Bereich über 10 Meter wird es normalerweise zu keiner Kollision kommen, außer die zulässigen Toleranzen wurden zu groß gewählt oder die Abbruchmaßnahmen wurden falsch vorgegeben. Abstände über 50 Meter werden im Diagramm nicht dargestellt, da es bei diesen Abständen nur durch falsche Wahl der Abbruchmaßnahmen zu Kollisionen

kommen kann. Durch die Farben soll dem Anwender ein erstes Gefühl für das Kollisionsrisiko des Tests gegeben werden.

Eine Erweiterung dieses Tools stellt eine zusätzliche theoretische Kollisionsüberprüfung beim Test (nicht Testabbruch) dar. Bei dieser Überprüfung werden die bekannten Objektabstände herangezogen. Mithilfe der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten und einer mittleren Bremsverzögerung von 7 m/s^2 ist es möglich, eine potentielle Kollision theoretisch abzuschätzen. Es werden dabei jedoch die Geschwindigkeitsvektoren nicht berücksichtigt, dadurch kann beispielsweise bei zwei Fahrzeugen im Folgeverkehr eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit angezeigt werden.

Kommt es laut dieser Grobabschätzungstool (und beider Simulationen) in erster Näherung zu keiner theoretischen Kollision, kann eventuell auf die Definition von Abbruchmaßnahmen verzichtet werden. Sollten jedoch kritische Bereiche aufgezeigt werden, ist mit der Definition weiterer sicherheitsrelevanter Parameter fortzufahren. Unter dem Menüpunkt Parameter (Abbildung 28) können die für das Programm Testcenter sicherheitsrelevanten Parameter definiert werden. Es geht dabei vor allem um Parameter, die in direktem Zusammenhang zu den Abbruchmaßnahmen stehen.

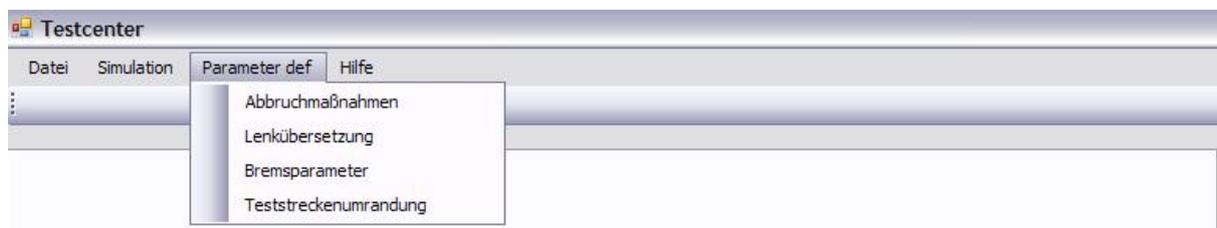


Abbildung 28: Parameter Definitionsbereich

5.2.6 Abbruchmaßnahmen definieren

Hier ist es möglich, verschiedenste Sicherheitsmaßnahmen zu definieren. Es öffnet sich automatisch ein Fenster zur Definition der Parameter (s. Abbildung 29).

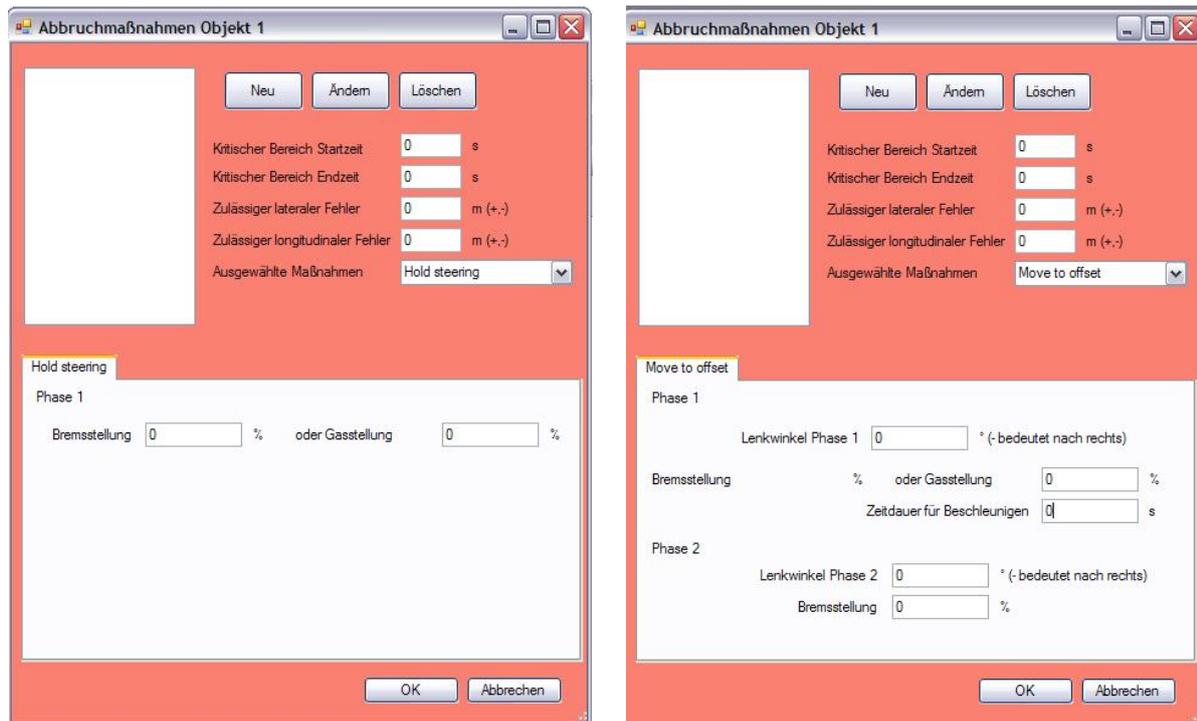


Abbildung 29: Abbruchmaßnahme „Hold Steering“ und „Move to offset“

So können die kritischen Bereiche mittels Simulationszeiten festgelegt werden. Für jeden dieser Bereiche können die zulässigen Positionstoleranzen (in Fahrzeuginnen- und Fahrzeugquerrichtung) gewählt werden. Auch gilt es, bei den Sicherheitsmaßnahmen zwischen Lenkung fixieren und einem vorzugebenden Lenkwinkel zu wählen. Die Sicherheitsmaßnahmen bestehen aus einer Bremsphase und einer Beschleunigungsphase. Wird in Phase eins Beschleunigen gewählt, wird automatisch eine zu definierende zweite Phase angehängt, in der das Fahrzeug zum Stillstand kommt. Es kann also entschieden werden ob lediglich gebremst oder vor dem Bremsen noch kurz (bis 2 Sekunden) beschleunigt werden soll.

Nach Abschluss der Sicherheitsparameterdefinition wechselt das Programm wieder in die „Testcenter“ Übersicht (Abbildung 30) und zeigt dort in einer Kurzfassung die definierten Sicherheitsmaßnahmen für alle Objekte. Durch Auswählen eines Parameters können diese auch im Nachhinein verändert werden. Des Weiteren ändert sich die Farbe der Anzeige Abbruchmaßnahmen im Bereich „Durchgeführte Sicherheitschecks“ auf Grün.

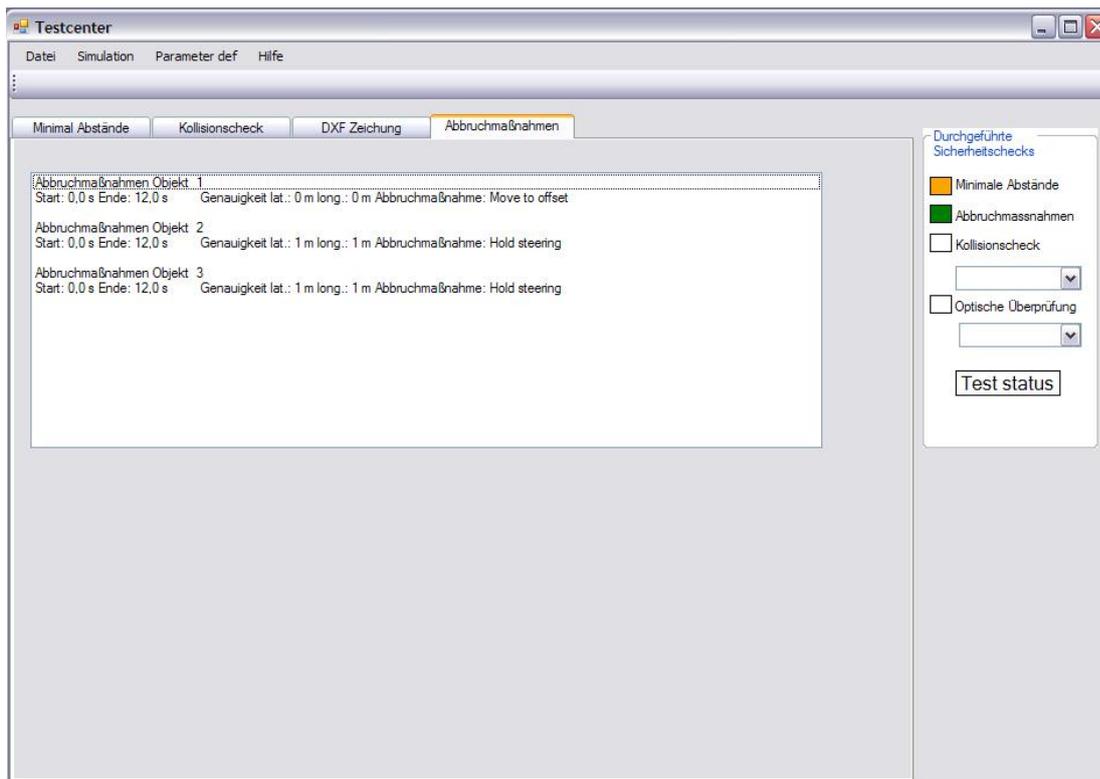


Abbildung 30: Abbruchmaßnahmen Übersicht

Wurden für Zeitbereiche keine Abbruchmaßnahmen definiert, werden für diese Bereiche automatisch vorbereitete Abbruchmaßnahmen berücksichtigt. Diese bestehen aus einem Fixieren der Lenkung und einem starken Verzögern bis zum Stillstand. Ebenso werden bei den automatisierten Abbruchmaßnahmen Sicherheitsbereiche von einem Meter rund um das Fahrzeug berücksichtigt. Es sollten also gerade bei kritischen Manövern, bei denen sich Fahrzeuge stark annähern, immer Abbruchmaßnahmen definiert werden.

5.2.7 Lenkparameter

Für die Abbruchmaßnahmen werden die Lenkwinkel an den Rädern angegeben, die mit Hilfe von PC-Crash simuliert werden können. Um jedoch nun dem Steuerroboter einen korrekten Lenkbefehl (Lenkradwinkel) vorzugeben, ist eine Umrechnung zwischen Rad- und Lenkradwinkel notwendig. Die Lenkungsdaten der Mercedes S-Klasse und der E-Klasse wurden von der Daimler AG zur Verfügung gestellt und wurden in das Programm integriert. Als Standard wurde eine lineare Lenkübersetzung von 1:15 gewählt. Es sollten jedoch im Sinne einer möglichst genauen Vorhersage die Lenkparameter angepasst werden.

5.2.8 Bremsparameter

Da natürlich verschiedene Fahrzeuge auch unterschiedliche Charakteristiken beim Verlauf Bremspedalstellung zu Bremswirkung aufweisen und auch dies eine Stellgröße beim Testabbruch darstellt, wurden auch hier Parameter der „S-Klasse“ und der „E-Klasse“ integriert (mittels Bremsroboter ermittelt). Auch hier kann eine „Lineare Übersetzung“ gewählt werden, die dann natürlich die Realität nur eingeschränkt wiedergibt.

5.2.9 Teststreckenumrandung

Weitere sicherheitsrelevante Parameter stellen die Teststreckendaten (Abmessungen, etc.) selbst dar, welche ebenfalls definiert werden müssen. So muss natürlich auch überprüft werden, ob die definierten Abbruchmaßnahmen die tatsächlich vorhandenen Dimensionen der Testumgebung überschreiten. Die Teststreckenumrandung wird über ein Reibungspolygon in PC-Crash realisiert. Bei der Überprüfung werden die einzelnen Räder dahingehend untersucht, welcher Reibwert vorherrscht. Beträgt dabei der Reibwert an mindestens einem Reifen 0.01 (entspricht Reibwert außerhalb der Testumgebung), gibt das Testcenter eine Fehlermeldung aus (Fahrzeug verlässt die Teststrecke).

Sind alle Parameter und Abbruchmaßnahmen definiert, kann mit den umfangreichen Simulationen fortgefahren werden.

5.2.10 Kollisionscheck

Beim Kollisionscheck (Abbildung 31) werden die geplanten Tests inklusive deren Testabbrüche systematisiert überprüft, indem man bewusst Testabbrüche entlang der vorgegebenen Trajektorie simuliert. Die Software führt dabei selbstständig dreißig Abbrüche pro Sekunde durch und überprüft dabei, ob es zu unerwünschten Kollisionen kommt. Dreißig Abbrüche pro Simulationssekunde werden durchgeführt, um selbst bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h (~30 m/s) mindestens jeden Meter einen Abbruch simulieren zu können und die dafür notwendige Simulationszeit in Grenzen zu halten. Für höhere Geschwindigkeiten müsste die Software auf eine größere Simulationsanzahl umgestellt werden, um keine zu großen Freiräume zwischen den einzelnen Simulationen entstehen zu lassen.

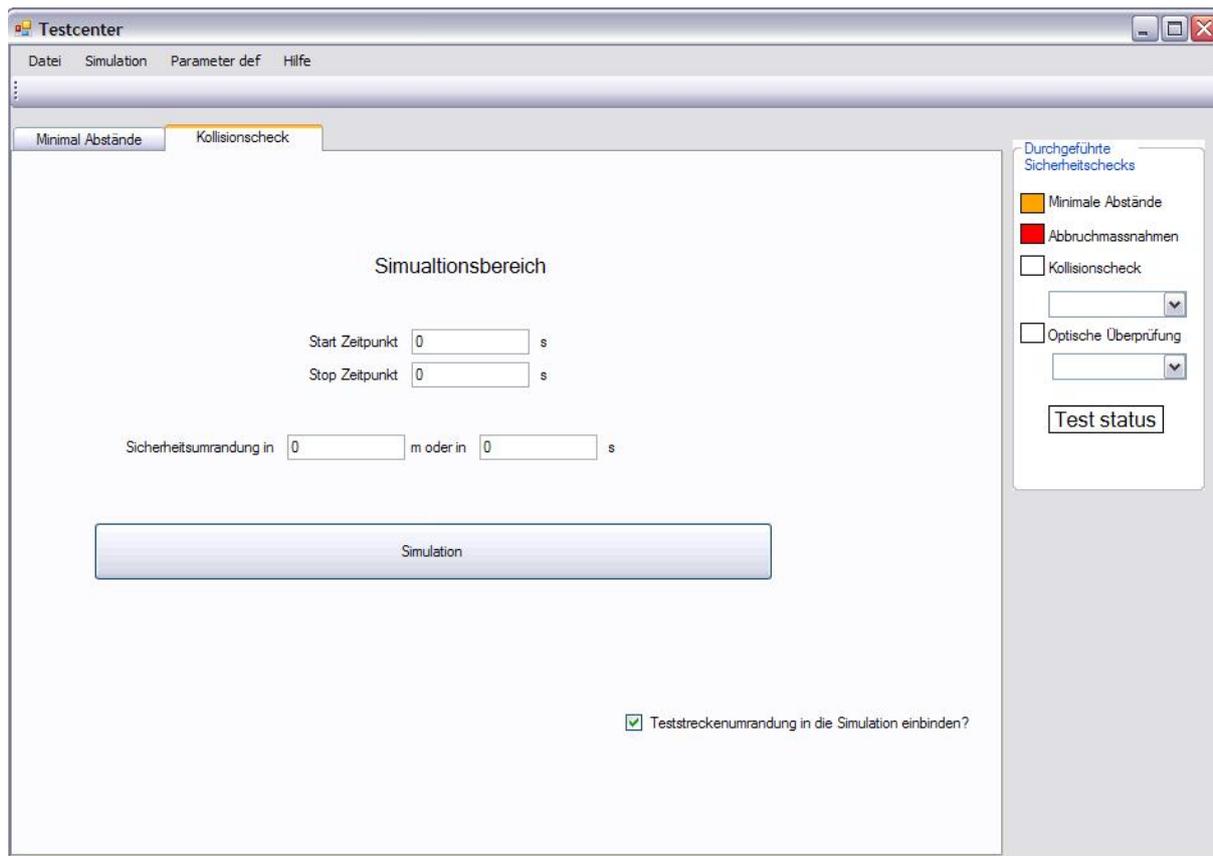


Abbildung 31: Kollisionscheck

Simulationsablauf (Beispiel):

Der mit PC-Crash geplante Test dauert beispielsweise 20 Sekunden. Die Testüberprüfung wird aufgrund der Minimierung der Rechenzeit nur für einen bestimmten Simulationszeitraum (z.B. Sekunde 13 bis Sekunde 17) durchgeführt, da vor allem in diesem Bereich Fahrzeugkollisionen zu erwarten sind (Kreuzungsbereich). Nun führt die Software eine Simulation des geplanten Tests bis zur Sekunde 13 durch (Die Fahrzeuge folgen sowohl zeitlich wie räumlich dem vorgegebenem Weg), leitet anschließend den im Vorfeld definierten Testabbruch ein und simuliert diesen bis zum Fahrzeugstillstand. Wird dabei keine Kollision detektiert, beginnt die Simulation des Tests von neuem und führt die Simulation bis zur Sekunde 13.03 durch. Ab diesem Zeitpunkt wird wiederum der dazugehörige Testabbruch simuliert, anschließend wiederum beurteilt und so weiter. Mittels dieser Methode kann für dieses Beispiel nach Abschluss der Simulationen gesagt werden, dass weder beim Test, noch beim Testabbruch zwischen Sekunde 13 und Sekunde 17 eine Kollision stattfindet.

Bei diesen Simulationen müssen selbstverständlich auch die zulässigen Längs- und Querrichtungstoleranzen (Positionsgenauigkeit) berücksichtigt werden, da sich das Fahrzeug

überall in seinen vordefinierten Toleranzbereichen (z.B. ein Meter Längs-, ein Meter Querrichtung) befinden darf. Zu diesem Zweck werden einfach die Fahrzeugkarosserien in der Simulation entsprechend vergrößert. Selbstverständlich führt eine solche Vergrößerung der Fahrzeugkarosserie auch zu veränderten Fahrdynamikeigenschaften des Fahrzeuges. Damit sich durch die Vergrößerung der Karosserie jedoch der gefahrene Pfad nicht ändert, können in PC-Crash die Fahrzeugparameter (Giermoment, etc.) frei definiert und somit hinsichtlich des Fahrzeugverhaltens wieder auf die Originaldaten korrigiert werden.

Ein zusätzlicher, frei wählbarer Sicherheitsabstand („safety shape“) kann ebenfalls über eine zusätzliche „Fahrzeugkarosserievergrößerung“ realisiert werden. Diese kann in Sekunden oder Metern gewählt werden. Bei der Wahl von Sekunden wird zum Zeitpunkt des Abbruchs die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ermittelt und darüber der zusätzliche Platzbedarf errechnet.

Es kann auch überprüft werden, ob die Fahrzeuge die Teststreckenumrandungen nicht verlassen. Zu diesem Zweck werden auch zuvor festgelegte Randbereiche überwacht. Dazu werden die Fahrzeuge entlang des Abbruchkurses wieder in 1-Meterschritten positioniert und eine Abfrage der Reibwerte bei allen Reifen durchgeführt. Durch die Möglichkeit, das Fahrzeug in PC-Crash frei zu gestalten, können die Reifen an die Fahrzeugecken gelegt werden, da es sonst natürlich auf Grund des Überhangs durchaus zu leichten Kollisionen kommen könnte. Der Reibwert wird verwendet, da die Teststrecke einen wesentlich höheren Reibwert (Eis 0.1) als die Umgebung (0.01) aufweist (wird beim Erstellen der Teststrecke so definiert). Dadurch kann leicht überprüft werden, ob ein Fahrzeug die Teststrecke verlässt. Sollte ein Fahrzeug den gewählten Bereich verlassen, wird dies dem Softwareanwender mitgeteilt und er kann das Szenario beziehungsweise die Abbruchmaßnahmen entsprechend anpassen.

Eine Einschränkung stellt natürlich die zur Verfügung stehende CPU Zeit dar. Da für jeden Testabbruch eine vollständige Simulation durchgeführt werden muss, sind die Rechenzeiten entsprechend lang. Aus diesem Grund ist es auch möglich, nur Teilbereiche des Szenarios zu überprüfen. Auch kann auf die Überprüfung der Teststreckenumrandung verzichtet werden, um die Rechengeschwindigkeit weiter zu erhöhen. Alle Bereiche die ohne Kollision geprüft wurden, werden im Programm rechts unter „Durchgeführte Sicherheitschecks“ und dem Punkt „Kollisionscheck“ angeführt. Konnten nach einer vollständigen Überprüfung und berücksichtigter Testumrandung keine Kollisionen oder sonstige Probleme festgestellt

werden, können die Versuche auf der Teststrecke durchgeführt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich um Simulationen handelt, die von vielen Faktoren abhängen, deshalb sollen die Ergebnisse mit der notwendigen Vorsicht behandelt werden (Berücksichtigung unterschiedlicher Reibwerte einer Teststrecke, etc.).

5.2.11 DXF Zeichnung:

Dieses Feature (Abbildung 32) soll einen optischen Überblick über die gesamte, detaillierte Testüberprüfung liefern. Dazu kann die Schrittweite der Darstellungen und der Simulationsbereich selbst gewählt werden. Auch hier werden alle Bereiche, die geprüft wurden, rechts unter „Durchgeführte Sicherheitschecks“ und dem Punkt „Optische Überprüfung“ angeführt.

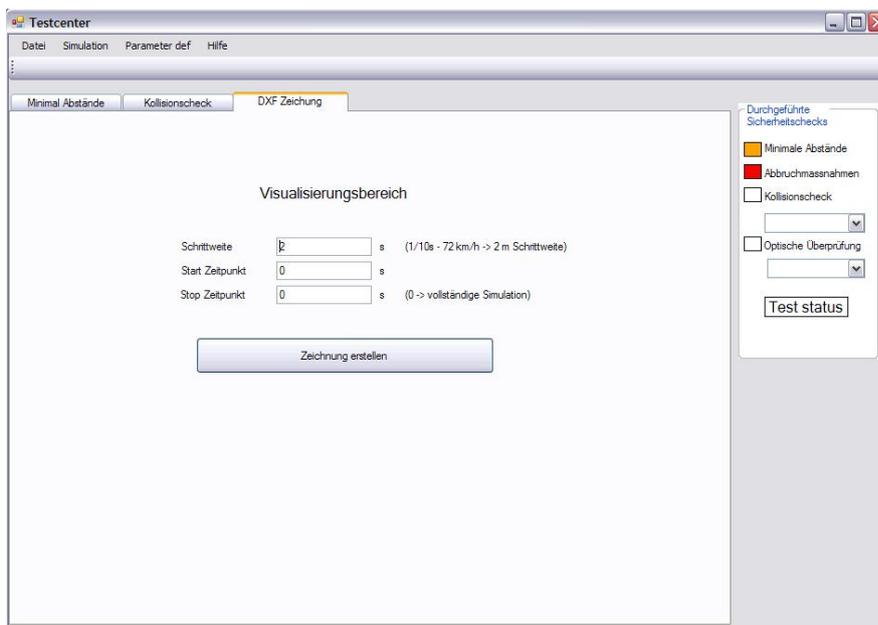


Abbildung 32: Überblicksdarstellung (Eingabefenster)

Für die Simulation werden – ähnlich dem vorigen Kapitel – die Testabbrüche entlang des gesamten Szenarios aufgezeichnet und in einem Zeichnungsfile dargestellt, um einen Gesamtüberblick über den geplanten Test zu erhalten. Für den benötigten Platzbedarf des Tests und des zugehörigen Testabbruchs werden dabei die Startpunkte, die Endlagen und die Reifenspuren in einem .dxf – File abgespeichert.

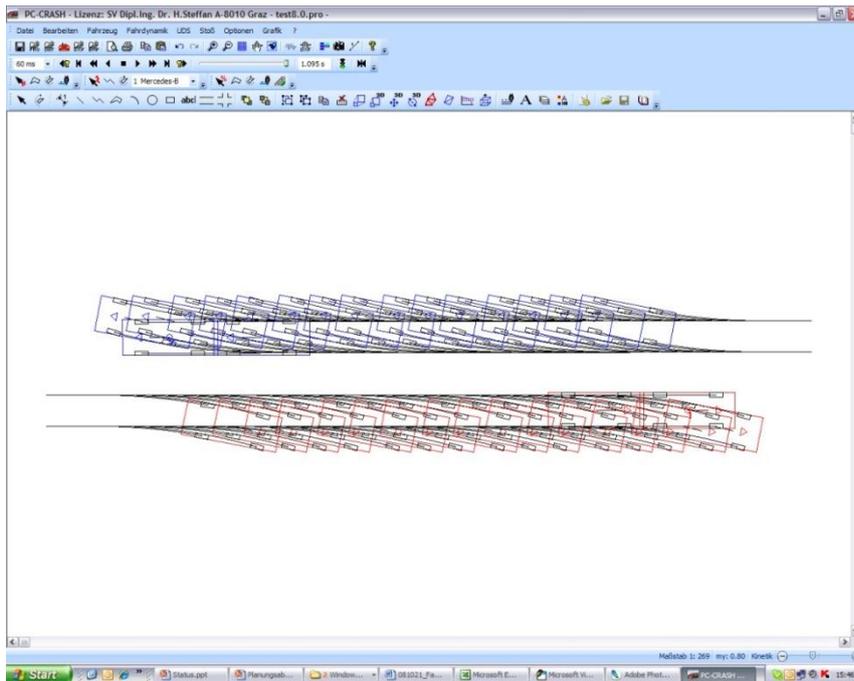


Abbildung 33: Überblicksdarstellung (.dxf)

Durch diese Darstellung (Abbildung 33) ist der Mindestplatzbedarf ersichtlich. Auch können optisch sehr leicht „sichere“ Bereiche für Kameras, etc. gefunden werden. In Abbildung 33 könnten also Kameras sogar zwischen den Fahrzeugen und auch außerhalb der gefahrenen Wege (Bremswege) gefahrlos positioniert werden.

5.3 Funktionsüberprüfung der Software Testcenter

In diesem Kapitel wird die Einsetzbarkeit der Software im realen Testbetrieb anhand eines Testgeländes für automatisiertes Fahren bei der Daimler AG [36, 2009] in Stuttgart nachgewiesen. Das dortige Testgelände wurde von der Daimler AG in Kooperation mit ABD und dem Institut für Fahrzeugsicherheit entwickelt. Vor allem der Bereich der sicheren Testplanung und Simulation wurde im Zuge dieser Arbeit realisiert. Dazu ist selbstverständlich neben der Entwicklung und Programmierung der Software auch der Nachweis der Funktionsfähigkeit unumgänglich. Im Zuge von Entwicklung und Tests ergaben sich weitere Fragestellungen, die in diesem Kapitel genauer behandelt werden.

Die Planung und Simulation von Testszenarien stellt hinsichtlich der Sicherheit den einfachsten und am leichtesten zu kontrollierenden Bereich der gesamten Test- und Testabbruchplanung dar. Dabei sind die Vorgabekurse lediglich auf die Fahrbarkeit hinsichtlich der Fahrdynamik und die Abstände zwischen den Objekten hinsichtlich zulässiger

Längs- und Querfehler zu überprüfen. Ergibt die Simulation keine auftretenden Fehler, ist in weiterer Folge die im Fahrzeug integrierte Regelung für die richtige Vorgabe von Lenkwinkel und Gaspedalstellung verantwortlich, um der Vorgabetrajektorie innerhalb zeitlicher und räumlicher Toleranzen zu folgen.

Wesentlich komplizierter und umfassender ist die Überprüfung, beziehungsweise auch die Festlegung der Abbruchmaßnahmen, um Fahrzeuge definiert und kollisionsfrei zum Stillstand zu bringen. Im Abbruchfall werden den Fahrzeugrobotern lediglich Steuerbefehle erteilt, um weitere Fehlerquellen (z.B. in der Regelung) zu minimieren. Diese Steuerbefehle beziehen sich jedoch auf das Lenkrad, beziehungsweise die Bremspedalstellung. Für die korrekte Simulation des Anhaltewegs sind jedoch die Radwinkel und die Verzögerungen entscheidend. Somit ist es notwendig für jedes verwendete Fahrzeug Kennlinien zu erstellen, die diese Zusammenhänge abbilden. Nur bei Verwendung der korrekten Übertragungskennlinien ist eine Simulation des Anhaltewegs überhaupt realisierbar. Einen weiteren entscheidenden Einfluss auf die Vorhersagbarkeit des Abbruchs durch die Simulation hat der Reibwert der Fahrbahn. Der Reibwert bestimmt die maximal erreichbaren Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung entscheidend mit. Wird ein Abbruchszenario mit einem Lenk- und Bremsmanöver für trockene Fahrbahn ausgelegt, so kann es bei einem Abbruch im Regen durchaus zu Problemen kommen. Um dieser Problematik entgegen zu wirken, können bei der Simulation mit PC-Crash beliebige Fahrbahnreibwerte vorgegeben werden. Um bei der Simulation noch verschiedene andere Faktoren wie die Reifentemperatur und die Profiltiefe, die auch Auswirkungen auf die maximalen Beschleunigungen haben, zu berücksichtigen, werden die vorliegenden Reibwerte auf 0.6 reduziert. Dadurch ergeben sich längere Bremswege und größere Kurvenradien, aber es kann gesagt werden, dass die Fahrzeuge sicher innerhalb des simulierten Weges zum Stillstand kommen.

Neben diesen Parametern kann noch die Stellgeschwindigkeit der Roboter einen entscheidenden Einfluss auf den weiteren Kurs der Fahrzeuge im Testabbruchfall besitzen. Diese äußern sich im Wesentlichen wie Verzögerungsglieder und können bei höheren Geschwindigkeiten zu Abweichungen im Meterbereich führen. Die Stellgeschwindigkeiten sollten idealerweise mittels Tests ermittelt werden um so die Prognosefähigkeit zu erhöhen. In der Software wurden die Stellzeiten als lineare Funktionen über die Zeit abgebildet.

Alle zuvor aufgezeigten Parameter wurden in die Software integriert, um möglichst exakte Simulationen der Tests und der Testabbrüche durchführen zu können. Bei den folgenden Realtests wurde versucht, maximale Abweichungen zwischen Vorhersage und dem realen Fahrzeugkurs bei Testabbrüchen zu erreichen. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die typischen Fehler kleiner oder gleich den erreichten sind. In Folge wurden verschiedene Szenarien mehrmals abgefahren und die Abweichungen zwischen Simulationskurs und Realkurs überprüft. Bei dieser Testreihe ergaben sich maximale Abweichungen bei folgendem Test: Als Vorgabekurs dient eine Gerade (für das Beschleunigen auf 50 km/h) mit anschließender Linkskurve (s. Abbildung 34). Diese Linkskurve soll mit einem Lenkwinkel von 5 Grad durchfahren werden. Wird nun eine Abbruchmaßnahme gewählt, welche aus einem Lenkmanöver (5 Grad nach rechts) und einer Vollbremsung besteht, so würde dieser Testabbruch einen sehr schwierig zu prognostizierenden Verlauf darstellen, da aufgrund der Lenkbewegung (-5 Grad auf +5 Grad) und der Vollbremsung, der weitere Kurs aufgrund der Dynamik, schwierig zu prognostizieren ist.

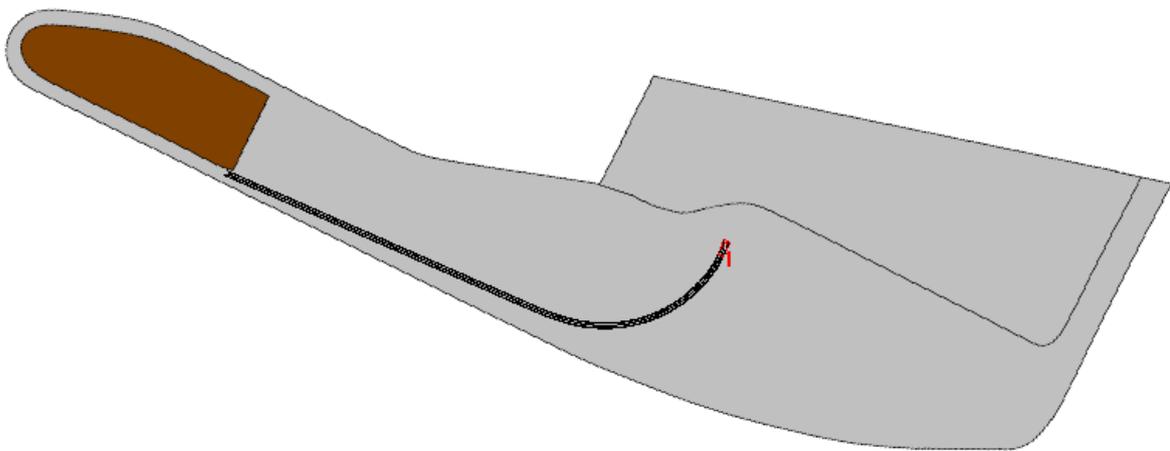


Abbildung 34: Realtest Linkskurve

In Abbildung 35 sind neben den Simulationen des Testabbruchs auch die Positionsdaten des realen Testabbruchs dargestellt. Die blaue Linie symbolisiert dabei den mittels Inertialplattform und DGPS aufgezeichneten Testabbruch. Da dieser Abbruch nicht zu einem exakten Zeitpunkt eingeleitet werden kann, ist es für die Visualisierung und Überprüfung der korrekten Vorhersage notwendig, mehrere Testabbrüche zu simulieren, um Unterschiede zwischen der simulierten und der realen Spur erkennen zu können. In Abbildung 35 wurden

dafür vier Simulationen durchgeführt, die jeweils durch die Endlagen (rote Fahrzeuge) und den dazugehörigen Reifenspuren gekennzeichnet sind.

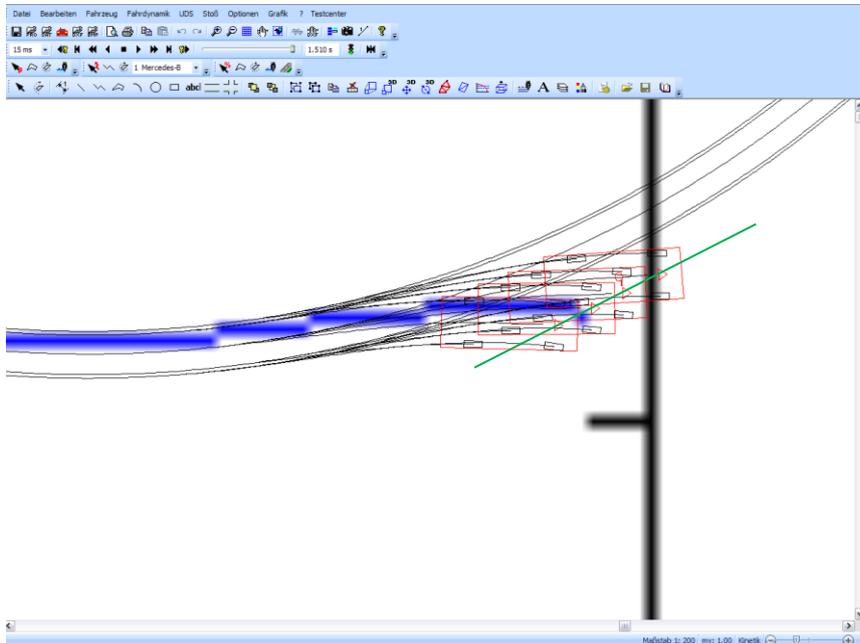


Abbildung 35: Abbruch Linkskurve

Die entscheidende Position, beziehungsweise die Position, die real aufgezeichnet wurde ist die Mitte der Vorderachse (vordefinierter Nullpunkt des Realfahrzeugs). Die grüne Linie stellt den Bereich der Fahrzeugpunkte (Mitte Vorderachse = rotes Dreieck) dar, in denen die Simulationen enden. Sehr schön ist zu erkennen, dass die grüne Linie den blauen Endpunkt (Fahrzeug Stillstand) kreuzt und somit eine exakte Vorhersage mittels Simulation möglich war. Selbstverständlich stellt die Vorhersage von Fahrmanövern mit größeren Geschwindigkeiten eine noch größere Herausforderung dar, doch da sowohl die Kursvorhersage, als auch die Endposition sehr gut übereinstimmen, ist davon auszugehen, dass dies auch für höhere Geschwindigkeiten gilt.

Das Hauptaugenmerk liegt bei den Simulationen des Abbruchs jedoch nicht darauf, diesen wie im Realtest bis auf den Endpunkt korrekt vorherzusagen, sondern in der Vermeidung kritischer Situationen (ungewollte knappe Vorbeifahrten, etc.). Um den Schutzbereich rund um die Fahrzeuge möglichst groß werden zu lassen, wird der Parameter der den Bremsweg bestimmt jedoch kleiner als der reale erreichbare Abstand gewählt um sicherzugehen, dass die Fahrzeuge auf alle Fälle innerhalb des Simulationspfades zum Stillstand gebracht werden können. Aufgrund des größeren Platzbedarfs bei der Planung ergeben sich zwar wesentlich

häufiger Kollisionswarnungen und höhere Kollisionswahrscheinlichkeiten, doch kann dadurch der Realtest, auf den es ja ankommt, entscheidend sicherer gemacht werden.

5.4 Testplanung anhand eines Realbeispiels

In diesem Kapitel wird nun der prinzipielle Testplanungs- und Abbruchmaßnahmenplanungsablauf anhand eines laut Realunfallgeschehen häufigen Szenarios erläutert. Der Fokus liegt dabei nicht auf dem Unfallgeschehen selbst, sondern auf dem eigentlichen Planungsablauf.

5.4.1 Schritt 1: Auswahl eines Testszenarios

Als erster Schritt ist die Festlegung eines zu testenden Szenarios notwendig. Für die Beschreibung des Planungsablaufs wird, basierend auf dem Realunfallgeschehen, das am häufigsten auftretende Unfallszenario in Österreich gewählt. Zu diesem Zweck wurde die österreichische zentrale Datenbank tödlicher Verkehrsunfälle ZEDATU [44, 2006] entsprechend den Unfalltypen (Kreuzung, Gegenverkehr, etc.) ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Unfalltyp	Frequenz	Tödlich verletzt	Schwer verletzt
Fußgängerunfälle	10,6%	16,3%	15,0%
Unfälle auf Kreuzungen	31,6%	11,6%	25,5%
Sonstige Unfälle mit zwei oder mehreren Beteiligten	2,3%	2,9%	2,2%
Unfall mit nur einem Beteiligten	22,4%	36,3%	33,6%
Unfälle im Begegnungsverkehr	8,8%	24,5%	13,2%
Unfälle im Richtungsverkehr	23,0%	7,9%	9,6%
Unfälle mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen mit zwei oder mehreren Beteiligten	1,3%	0,5%	1,1%
Gesamtergebnis	100%	100%	100%

Tabelle 6: Häufigkeit der einzelnen Unfalltypen, 2002 – 2007

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der Kreuzungsunfall mit 31,6 % der häufigste, aber nicht der mit dem größten tödlichen Verletzungsrisiko ist. Dieser Unfalltyp wird in dieser Arbeit

für die weiteren Betrachtungen herangezogen. Aus der genaueren Analyse der in der Datenbank enthaltenen Unfälle ergibt sich, dass bei allen Unfällen zumindest ein Fahrzeuglenker die Vorrangbestimmungen und Verkehrsregeln ungenügend beachtet hat. Es wird der Verkehrssituation zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt, beziehungsweise diese falsch eingeschätzt. Aus diesem Grund ist der Einsatz von aktiven Sicherheitssystemen, die den Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützen können, wünschenswert.

Als zusätzliche Randbedingung wird angenommen, dass es sich um eine Kreuzung im Ortsgebiet (s. Abbildung 36) handelt und sich ein Fahrzeug auf einer Vorrangstraße mit 50 km/h befindet. Ein zweites Fahrzeug fährt aus einer Nebenstraße mit 30 km/h in die Kreuzung ein und kollidiert mit dem auf der Vorrangstraße befindlichen Fahrzeug.

5.4.2 Schritt 2: Planung des Grundscenarios

Je nach Aufgabenstellung ist die Kollisionsfreiheit keine Einschränkung für die Nachstellbarkeit eines solchen Szenarios. Beispielsweise ist für den Test eines Fernbereichs-Radars [7] (Reichweite bis zu 200 m) die eigentliche Kollision nicht zwingend von Interesse. Aus diesem Grund können in der Testplanung entsprechende Aktionen gesetzt werden, bei denen die Fahrzeuge kurz vor einer Kollision ausweichen, um damit eine ungewollte Beschädigung zu verhindern. Um auch Nahbereichssensoren effektiv zu testen, kann das Kreuzungsszenario so abgewandelt werden, dass sich bei konstanter Fahrt der beiden Fahrzeuge eine knappe Vorbeifahrt (< ein Meter) ergibt. Dies wird in weiterer Folge angewandt um die aktiven Sicherheitssysteme möglichst effektiv und realistisch testen zu können. Die zentrale Überdeckung ergibt sich bei einem solchen Szenario bei einem Abstand von 7,5 Metern vor dem Kreuzungspunkt (s. Abbildung 36). Dabei fährt das blaue Fahrzeug mit 30 km/h durch die Kreuzung, während das rote die Kreuzung mit 50 km/h durchfährt.

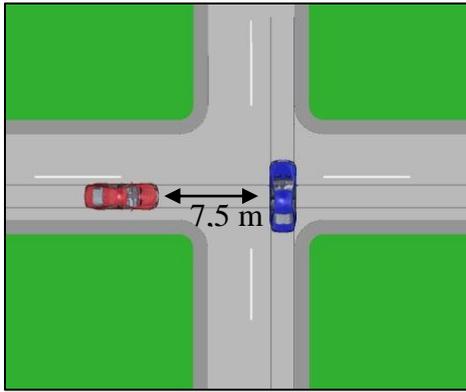


Abbildung 36: Zentrale Überdeckung beim Kreuzungsszenario

5.4.3 Schritt 3: Ermittlung von kritischen, zeitabhängigen Bereichen

Die Ermittlung von kritischen Zeitbereichen ist bei leicht überschaubaren Szenarien wie dem betrachteten Kreuzungsunfall relativ einfach. Für dieses Beispiel gibt es nur einen kritischen Bereich, welcher sich im Bereich des Kreuzungspunkts befindet. Falls aber das betrachtete Szenario mehrere Fahrzeuge umfasst, beziehungsweise deutlich komplexer ist, ist das Erkennen der kritischen Bereiche schwierig. Mit Hilfe des entwickelten Planungstools können diese Bereiche automatisch detektiert werden. Als Ergebnis der automatischen Suche der kritischen, zeitabhängigen Bereiche erhält man für das nachzustellende Kreuzungsszenario das nachfolgend abgebildete Diagramm, das die Abstände der beiden Fahrzeugschwerpunkte über die Zeit (Testdauer 10.7 Sekunden) darstellt. In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die beiden Fahrzeuge zuerst annähern und der minimale Schwerpunktabstand zirka fünf Meter beträgt. Anschließend wird der Abstand nach der knappen Vorbeifahrt wieder größer. Als kritisch anzusehen sind Bereiche, bei denen der Schwerpunktabstand zwischen den Fahrzeugen kleiner als zehn Meter ist. Die Abbruchmaßnahmen in diesem Bereich sollten einer detaillierten Analyse unterzogen werden. Nichts desto trotz sollten auch die Abbruchmaßnahmen in anderen Abschnitten der Versuchstrajektorie überprüft werden.

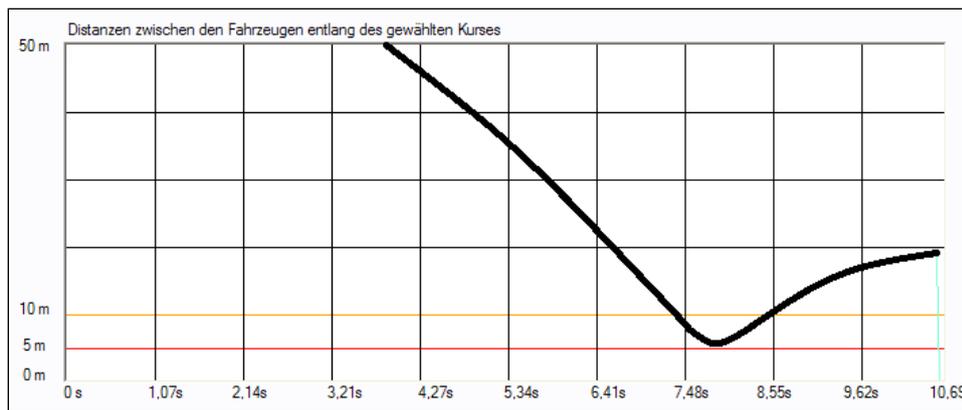


Diagramm 1: Darstellung der Fahrzeugschwerpunktabstände bei einem Kreuzungsszenario

5.4.4 Schritt 4: Definition von Auslaufräumen und Abbruchmaßnahmen

Nach der Bestimmung der kritischen Bereiche müssen im nächsten Schritt die Auslaufräume, beziehungsweise die exakten Abbruchmaßnahmen definiert werden. Für das betrachtete Kreuzungsszenario (Abbildung 37) befinden sich die Auslaufräume jeweils rechts der Fahrzeuge (aus Erfahrung). Auch genügt infolge der Testkonfiguration ein zeitlich nicht veränderlicher statischer Auslaufraum, da sich die effektivsten Abbruchmaßnahmen während der gesamten Simulationszeit nicht ändern. Bei den Abbruchmaßnahmen gilt es, das rote Fahrzeug (links) durch lenken und bremsen möglichst schnell zum Stillstand zu bringen, während das blaue Fahrzeug noch kurz beschleunigt, um aus dem Gefahrenbereich zu gelangen. Nach der kurzen Beschleunigungsphase lenkt auch das blaue Fahrzeug nach rechts und wird bis zum Stillstand verzögert. Infolge dieser beiden Abbruchmaßnahmen kann der Fahrzeugabstand deutlich vergrößert und dadurch das Risiko einer unerwünschten Kollision verringert werden. Die Auslaufräume, beziehungsweise die Abbruchmaßnahmen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. In dieser Abbildung überschneiden sich die Auslaufräume geometrisch. In der Realität ist dieser Umstand für dieses Kreuzungsszenario unproblematisch, da sich – aufgrund des zeitlichen Fahrzeugpositions-verlaufs (im Abbruchfall), die beiden Fahrzeuge nicht zur selben Zeit in diesem Überschneidungsbereich befinden können.

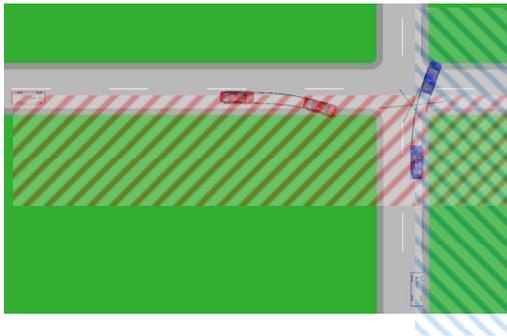


Abbildung 37: Auslaufräume und Abbruchmaßnahmen für ein Kreuzungsszenario

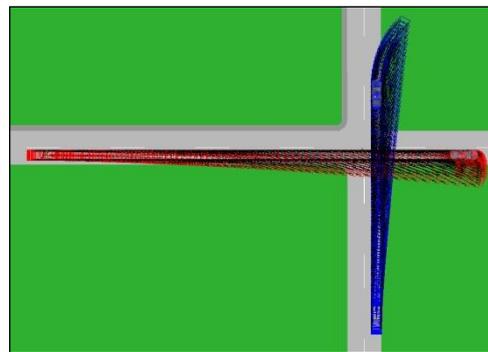


Abbildung 38: Darstellung aller Simulationen zur Abbruchmaßnahmenüberprüfung für ein Kreuzungsszenario

5.4.5 Schritt 5: Wirksamkeitsüberprüfung der Abbruchmaßnahmen

Die Wirksamkeitsüberprüfung der definierten Abbruchmaßnahmen kann ebenfalls mit Hilfe der Planungssoftware automatisch ermittelt werden. Zu diesem Zweck müssen in einem ersten Schritt zuerst die zulässigen räumlichen wie zeitlichen Toleranzen festgelegt werden. Für das betrachtete Kreuzungsszenario werden die auftretenden Abweichungen mit einem halben Meter angenommen. Diese Abweichung ergibt sich aus den systembedingten räumlichen Positionsabweichungen (Querfehler) und den zeitlichen Abweichungen (z.B. 0.5 Meter bei 50 km/h entspricht einer maximal zulässigen zeitlichen Abweichung von 36 ms), wobei für diese die Maximalgeschwindigkeit berücksichtigt werden muss. Die Planungssoftware startet in einem nächsten Schritt systematisiert alle notwendigen Simulationen und überprüft, ob die beiden Fahrzeuge zu einem beliebigen Abbruchzeitpunkt und den dabei möglichen Trajektorien Abweichungen miteinander oder mit Hindernissen kollidieren (s. Abbildung 38). Falls es infolge der definierten Abbruchmaßnahmen zu einer Kollision kommt, müssen die Abbruchmaßnahmen, beziehungsweise die Auslaufräume neu definiert werden. Bei Kollisionsfreiheit ist davon auszugehen, dass es auch bei einem Testabbruch zu keiner ungewollten Fahrzeugbeschädigung kommt. Voraussetzung ist aber, dass die beiden Fahrzeuge noch kontrollierbar sind, also gesteuert lenken, bremsen und beschleunigen können.

5.4.6 Schritt 6: Ermittlung von Raumbedarf und sicheren Bereichen

Durch die optische Darstellung der Fahrzeugumrisstrajektorien aller durchgeführten Simulationen, können neben dem für den Test benötigten Platzbedarf auch „sichere“ Bereiche der Testumgebung ermittelt werden (Abbildung 39). Dies sind Regionen, die kein Fahrzeug während des Tests oder infolge der gewählten Abbruchmaßnahmen erreichen sollte. Dort kann beispielsweise notwendiges Mess- und Testequipment auf der Teststrecke positioniert werden. Für das beispielhafte Kreuzungsszenario wäre ein solcher sicherer Bereich links oben in der nachfolgenden Abbildung.

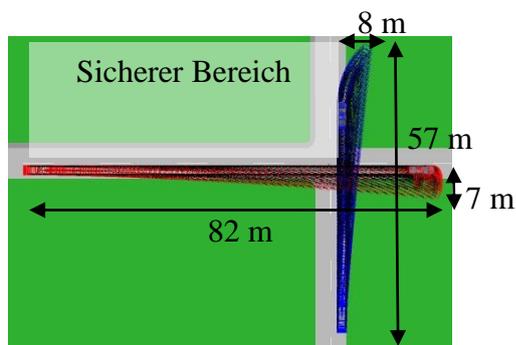


Abbildung 39: Darstellung des maximalen Raumbedarfs und sicheren Bereiches für ein Kreuzungsszenario

Ausgehend von den Simulationen und der optischen Überprüfung kann davon ausgegangen werden, dass dieser Test mit den gewählten Abbruchmaßnahmen sicher durchführbar ist. Die Spurpunktdaten und die gewählten Abbruchmaßnahmen können den Fahrzeugen übermittelt und der Test durchgeführt werden.

Durch die Verwendung umfangreicher Planungssoftware ist es möglich, bereits bei der Planung eine Aussage darüber zu treffen, ob geplante Szenarien in der gewünschten Form durchführbar sind und auch die Realtests die gewünschten Ergebnisse liefern. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass diese Test bereits in den verschiedenen Abteilungen geplant und simuliert werden können, das Teststreckenpersonal muss lediglich die geplanten Szenarien hinsichtlich der Sicherheit überprüfen. Durch die Simulationssoftware kann das Teststreckenpersonal auf einfache Weise die Sicherheitsmaßnahmen auf ihre Durchführbarkeit hin überprüfen und, falls notwendig, Änderungen im Bereich der Sicherheitsplanung durchführen. Es sind keine umfangreichen Vortests notwendig, um die Durchführbarkeit nachzuweisen. Dadurch ist ein wesentlicher Zeitgewinn und Sicherheitsgewinn möglich.

6 Hardware für eine aktive Sicherheitsumgebung

Neben den Sicherheitsüberlegungen und einer Software für die einfache Planung der Szenarien ist selbstverständlich auch die verwendete Hardware von entscheidender Bedeutung. Da eine vollständige Eigenentwicklung aller Komponenten für eine aktive Sicherheitsumgebung nicht sinnvoll und vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit aus gesehen unsinnig wäre, galt es am Markt befindliche Systeme hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zu analysieren. Anhand von Herstellerangaben und Tests wurden die am besten geeigneten Komponenten für die Entwicklung einer aktiven Sicherheitsumgebung eruiert.

6.1 Positionsmesssysteme

Die Hauptaufgabe des Positionsmesssystems ist es, die exakte Position des Fahrzeuges zu bestimmen. Dies ist einerseits wichtig, um eventuelle Fahrkorrekturen veranlassen zu können, falls das Fahrzeug von einer vorgegebenen Kurstrajektorie abweicht. Andererseits muss noch ein übergeordnetes Sicherheitssystem die Lage aller Versuchsfahrzeuge zu jedem Zeitpunkt kennen, um auf mögliche Gefahrensituationen entsprechend zu reagieren.

Um die Anforderungen an das Positionsmesssystem zu formulieren, ist es notwendig, zuerst die gewünschte Genauigkeit des Gesamtsystems festzulegen. Das Ziel ist die Regelung eines Kraftfahrzeuges bei 70 km/h mit einer Genauigkeit von +/- 10 cm in Fahrt- und Querrichtung (dies stellt eine Mischung aus Stadt- und Freilandverkehr dar). Diese kleine räumliche Toleranz birgt eine sehr große Herausforderung an die einzelnen Komponenten und deren Genauigkeit.

Aus Kosten- und Sicherheitsgründen werden im Zuge dieses Projektes keine Personenkraftwagen, sondern lediglich Modellautos verwendet. Die entwickelten Algorithmen und die Hardware werden aber so konzipiert, dass zu einem späteren Zeitpunkt das Modellauto leicht durch einen Personenkraftwagen ersetzt werden kann. Aus den oben genannten geometrischen Anforderungen an die Genauigkeit des Systems ergeben sich für das Positionsmesssystem folgende Eckdaten: Die Positionsbestimmungsrate soll für die Regelung des Kraftfahrzeuges im Bereich um 100 Hz (für 70 km/h Stützpunkte alle 20 cm) und für die Regelung des Modellautos im Bereich um 20 Hz (für 20 km/h Stützpunkte alle 30 cm) liegen.

Nachfolgend werden mögliche verwendbare Technologien für eine aktive Sicherheitsumgebung beschrieben. Dargestellt sind deren technisches Potential im Allgemeinen, beziehungsweise wird deren Eignung für eine aktive Sicherheitsumgebung analysiert.

6.1.1 GPS

Das bekannteste Positionsmesssystem ist das NAVSTAR Global Positioning System [45] des US Verteidigungsministeriums, bekannt unter dem Namen „GPS“. Es gibt zwar noch weitere Positionsmesssysteme [14], aber die Funktionsweise ist bei allen Systemen ähnlich. Beim US-Amerikanischen „GPS“ umkreisen mindestens 24 Satelliten gleichzeitig die Erde. Diese senden jeweils ihre aktuelle Position und die aktuelle Zeit aus. Aufgrund der Laufzeiten der Signale und der aktuellen Zeit kann die Position mittels dreier Satelliten bestimmt werden. Da die meisten „GPS“ Empfänger jedoch über keine genaue Zeit (hochgenau) verfügen, wird ein vierter Satellit zur Positionsbestimmung benötigt. Verliert der Empfänger das Signal eines Satelliten (z.B. Häuserblock im Weg, oder der Satellit verlässt den Sichtbereich) so kommt es zu Positionssprüngen die auch 20 Meter betragen können.

Um die Genauigkeit des „GPS“ zu erhöhen, wird das Signal auf zwei Frequenzen (L1-1575 Ghz und L2-1227 Ghz) ausgesendet. So können die atmosphärischen Einflüsse besser bestimmt und die Positionsdaten entsprechend abgeglichen werden. Unter Verwendung beider Frequenzen sind Genauigkeiten im Meterbereich erreichbar. Global Positioning Systeme sind aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungen sehr günstig.

Auch das in Zukunft verfügbare „Galileo“ System [12] soll Abweichungen bis 45 cm aufweisen und ist in seiner einfachsten Anwendung ohne Korrektursignale nicht für diesen Einsatzbereich ausreichend. In Zukunft könnte durch die Kombination von „GPS“ und „Galileo“ jedoch eine ausreichende Positionsgenauigkeit (größere Anzahl Satelliten, unterschiedliche Sendesignale) erreicht werden.

6.1.2 DGPS

Um mit „GPS“ eine Genauigkeit im Zentimeterbereich zu erreichen, ist neben der Verwendung beider Frequenzen ein Referenzsignal notwendig. Dieses Referenzsignal kann entweder von anderen Satelliten, von Handybetreibern, von lokalen Referenzstationen oder

von einer eigenen Referenzstation stammen. Dieses Referenzsignal liefert weitere positionsabhängige Korrekturdaten. Dabei werden die Positionsdaten einer fix positionierten (vermessen) Referenzstation (da die GPS Daten nur so absolut stimmen) mit den GPS Daten verglichen und die Korrekturdaten an den DGPS Anwender (siehe Abbildung 40) weitergeleitet. Die besten Korrekturdaten liefert eine eigene Referenzstation, da diese die geringste Entfernung zum Empfänger aufweist. Mit Hilfe dieser sind Genauigkeiten von +/- 2 cm erreichbar. Die Übertragungsrate der Positionsdaten beträgt dabei aktuell maximal 20 Hz.

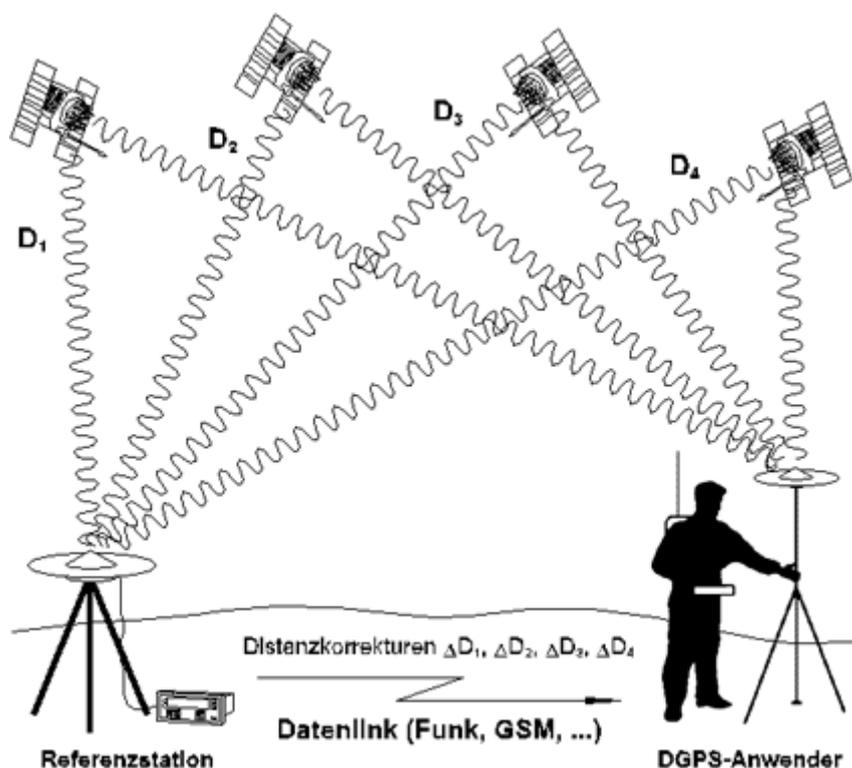


Abbildung 40: DGPS Funktion [34]

Für die Regelung eines Modellautos sind diese Übertragungsraten ausreichend (je größer die Distanzen zwischen den Stützpunkten, umso schwieriger wird natürlich die Regelung und die Einhaltung der geforderten Genauigkeit). Bei Geschwindigkeiten bis 20 km/h wird die Position des Modellautos minimal alle 30 cm abgetastet. Um eine Regelung eines Kfz bei höheren Geschwindigkeiten zu ermöglichen, sind jedoch Übertragungsraten von etwa 100 Hz wünschenswert. Dadurch würde sich bei einer Geschwindigkeit von 72 km/h alle 20 cm eine Abtastung ergeben.

DGPS Systeme sind also bezüglich der geforderten Abtastraten und Genauigkeiten zur Regelung von Modellautos geeignet. Um Kfz im höheren Geschwindigkeitsbereich zu überwachen, sind jedoch höhere Abtastraten notwendig. Diese können durch Kombination von DGPS und Inertialplattform erreicht werden.

6.1.3 DGPS mit Inertialplattform

Bei einer Inertialplattform handelt es sich um ein Messsystem, das Beschleunigungs- und Drehratensensoren in allen drei Koordinaten besitzt. Durch die Bestimmung der Beschleunigungen kann der zurückgelegte Weg durch Integration der Messsignale bestimmt werden. Wenn man die Ausgangsposition des Fahrzeuges kennt, ist es möglich, über Integration, die Position zu einem bestimmten Zeitpunkt zu ermitteln. Bei langen Messungen kommt es zu einer Abweichung, die einerseits durch die Integration, andererseits durch eine mögliche Sensordrift zu Stande kommt. Diese Drift der Inertialplattformensoren kann nun beispielsweise mittels DGPS korrigiert werden. Dadurch ergeben sich Übertragungsraten der Positionsdaten bis 250 Hz im Genauigkeitsbereich um ± 2 cm.

Solche Plattformsysteme werden von verschiedensten Firmen hergestellt. So stellen beispielsweise OXTS [32] und iMAR [22] Systeme für zivile und militärische Nutzung her. Die Unterschiede zwischen den Systemen sind marginal und können deshalb vernachlässigt werden. In Abbildung 41 ist eine Kombination aus DGPS und Inertialplattform (blau), im kleinen Bild rechts ist eine typische GPS-Antenne für die Basisstation abgebildet.



Abbildung 41: Inertialplattform [6]

Die Kombination von DGPS und Inertialplattform liefert also Positionsdaten mit über 100 Hz im Genauigkeitsbereich von ± 2 cm. Ausfälle, die bei DGPS zum Beispiel durch Abschattungen hervorgerufen werden, können durch die Inertialplattform verringert, beziehungsweise durch Überbrückung gänzlich vermieden werden. Die teuren Anschaffungskosten pro Fahrzeug und die relativ geringe Crashresistenz (60 g) sind Negativpunkte eines DGPS Systems in Kombination mit einer Inertialplattform.

6.1.4 Local Positioning Measurement System

Das Local Positioning Measurement System [10, 2006] der Firma ABATEC besteht im Wesentlichen aus Basisstationen (Empfängern) und Transpondern (Sendern). Der Transponder sendet ein Signal aus, welches von den Basisstationen empfangen wird. Aufgrund der unterschiedlichen Signallaufzeiten zu den unterschiedlichen Basisstationen kann die Position innerhalb der Testanlage bestimmt werden. Die Laufzeiten werden durch eine spezielle Frequenzmethode in Distanzen umgerechnet.

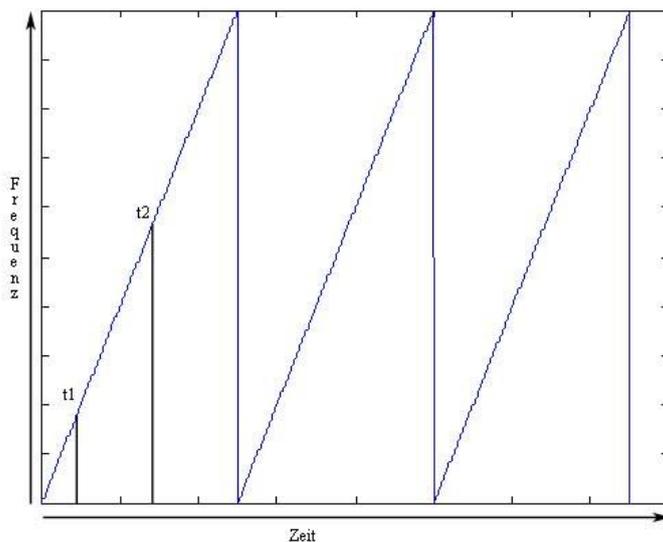


Diagramm 2: Abstandsbestimmung anhand der Frequenz

Beim LPM System (s. Abbildung 42) wird ein Transponder (Referenztransponder) zentral am Testgelände positioniert und genau vermessen. Alle Transponder senden ein Signal aus, welches laufend die Frequenz (Diagramm 2) bis zu einem Maximum erhöht. Dann beginnt das Signal von „neuem“.

Wird nun im regulären Betrieb die Position eines Transponders abgefragt, erhält eine Basisstation ein Signal mit einer bestimmten Frequenz (t_2). Dies alleine würde nicht genügen, um die Entfernung zu bestimmen. Da jedoch auch die Frequenz des Referenztransponders (t_1) gemessen wird und dessen genaue Position bekannt ist, kann die Entfernung im Zentralrechner bestimmt werden. Ähnlich dem Prinzip des „GPS“ kann, basierend auf den Daten von mindestens drei Basisstationen, die genaue Position des Transponders bestimmt werden. Die Position wird mit $1000/n$ Hz erfasst, wobei n der Anzahl der verwendeten Transponder entspricht. Somit könnten bis zu 10 Transponder verwendet werden, um noch Daten mit einer Rate von 100 Hz zu erhalten. Die angegebene Genauigkeit beträgt relativ ± 5 cm. Es sind somit Abtastrate und Genauigkeit ausreichend für eine aktive Testumgebung mit realen Fahrzeugen.

Ein weiterer Vorteil sind die einfach zu montierenden, robusten Transponder. Da bei einem Crash lediglich die Transponder beschädigt werden und diese relativ günstig und robust im Vergleich zu Inertialplattformen sind, wäre dieses System bei Crashversuchen zu bevorzugen.

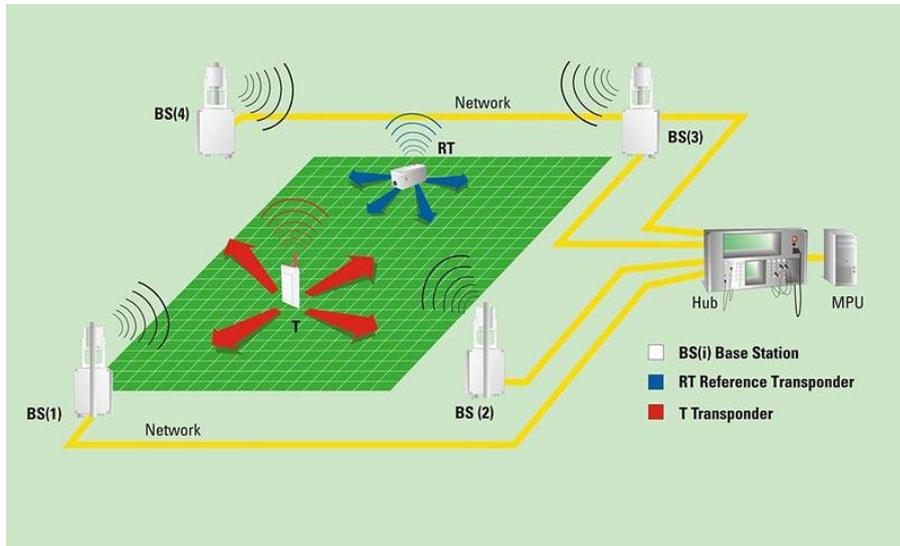


Abbildung 42: LPM System [10, 2006]

Es gibt aktuell zumindest einen weiteren Anbieter eines Systems mit einer sehr ähnlichen Funktionsweise wie der des LPM Systems. Das LPR System von Symeo [4] liefert im Vergleich zum LPM System nur bis zu 20 Hz und ist somit für den Einsatz im realen Fahrzeug nur eingeschränkt geeignet.

6.1.5 *Positionsbestimmung mittels WLAN*

Zur Positionsbestimmung mittels WLAN werden mindestens drei Accesspoints benötigt. Die Genauigkeit liegt im Moment im Meterbereich. Die Entwicklung des Systems befindet sich aktuell im Anfangsstadium und wird teilweise zur Innenraumüberwachung in Bürogebäuden eingesetzt. Ein Vorteil sind die sehr günstigen Anschaffungskosten. Probleme im Zusammenhang mit der Positionsbestimmung sind jedoch die Echtzeitfähigkeit und die Reichweite des Systems (<100 m), weshalb es für die Teststrecke nicht in Frage kommt.

6.1.6 *Positionsbestimmung mittels optischer Methoden*

Bei der Positionsbestimmung mittels optischer Methoden können prinzipiell zwei Arten unterschieden werden. Bei der ersten wird die Position des Fahrzeugs mittels mehrerer Laser bzw. Digitalkameras, die entlang der Teststrecke montiert sind, ermittelt. Bei der zweiten Art befindet sich der Laser am Fahrzeug. Durch Abtastung der Teststrecke kann die Position ermittelt werden. Beide Systeme befinden sich jedoch noch im Entwicklungsstadium, weshalb darauf nicht näher eingegangen wird. Sie können jedoch zukünftig vor allem im Indoorbereich durchaus von Nutzen sein, da funkwellenbasierte Systeme im Indoorbereich nur sehr eingeschränkt funktionieren.

6.1.7 *Ergebnisse*

In der nachfolgenden Tabelle ist die Eignung der verschiedenen Positionierungssysteme nach verschiedensten Kriterien übersichtlich zusammengefasst. Als Entscheidungsgrundlage dienen alleine die Herstellerangaben. Unter Genauigkeit und Abtastrate wird bewertet, ob die Systeme die gewünschten Anforderungen für eine aktive Testumgebung erreichen. Das Crashverhalten gibt an, wie problematisch oder unproblematisch Kollisionen mit den Positionsbestimmungssystemen in Bezug auf Hardwarebeschädigungen sind. Unter Echtzeitfähigkeit versteht man die Möglichkeit, Positionsdaten „laufend“ und in gewissen Zeitabständen zu erhalten. Die Genauigkeit, Abtastrate und Echtzeitfähigkeit sind die in erster Linie entscheidenden Kriterien. Können diese nicht erfüllt werden, ist dies ein automatischer Ausscheidungsgrund. In der Tabelle bedeutet ein „+“ in diesem Zusammenhang „gut geeignet“, „o“ bedeutet „noch zu akzeptieren“ und „-“ „nicht geeignet“ für den Einsatz im Modellfahrzeug.

System	Genauigkeit	Abtaste	Echtzeitfähigkeit	Crashverhalten	Preis
GPS	-	-	O	+	+
DGPS	+	O	+	O	+
DGPS + Inertialplattform	+	+	+	-	-
LPM	+	+	+	+	O
WLAN	-	-	-	+	+

Tabelle 7: Vergleich der Positionsmesssysteme

Aufgrund der Herstellerangaben scheinen lediglich das DGPS, DGPS plus Inertialplattform und das LPM System in der Lage zu sein, Positionsdaten mit der gewünschten Genauigkeit und der erforderlichen Abtaste zu liefern. Diese drei Systeme wurden in einem nächsten Schritt in einem Feldversuch genauer bewertet, um die Herstellerangaben zu überprüfen. Mit Hilfe dieser Untersuchung war es möglich, eine objektive Systementscheidung zu treffen. Zu berücksichtigen gilt jedoch, dass die Systeme natürlich nicht für diese Anforderungen ausgelegt wurden, und lediglich auf die Tauglichkeit für das Testen aktiver Sicherheitssysteme überprüft wurden. Dabei ergaben sich in Kurzform folgende Ergebnisse:

LPM

Die angegebene Genauigkeit von +/- 5 cm konnte nicht erreicht werden. Die vorgenommenen Messungen zeigten immer wieder kurzzeitige Abweichungen im Bereich von mehreren Metern. Aufgrund der durchgeführten Tests (statische Test verteilt über das gesamte Testgelände, dynamische Tests mit Positionserfassung eines Fahrzeugs, dynamische Test mit Positionserfassung einer elektrischen Eisenbahn) kann davon ausgegangen werden, dass diese Ausreißer positionsabhängig und in einer oder zwei Vorzugsrichtungen auftreten. Selbst unter Vernachlässigung dieser Ausreißer schwankt die absolute Genauigkeit im Bereich von +/- 12 cm. In Diagramm 3 ist eine Messung eines stehenden Objektes dargestellt. Die Ausreiser wurden dabei bereits entfernt.

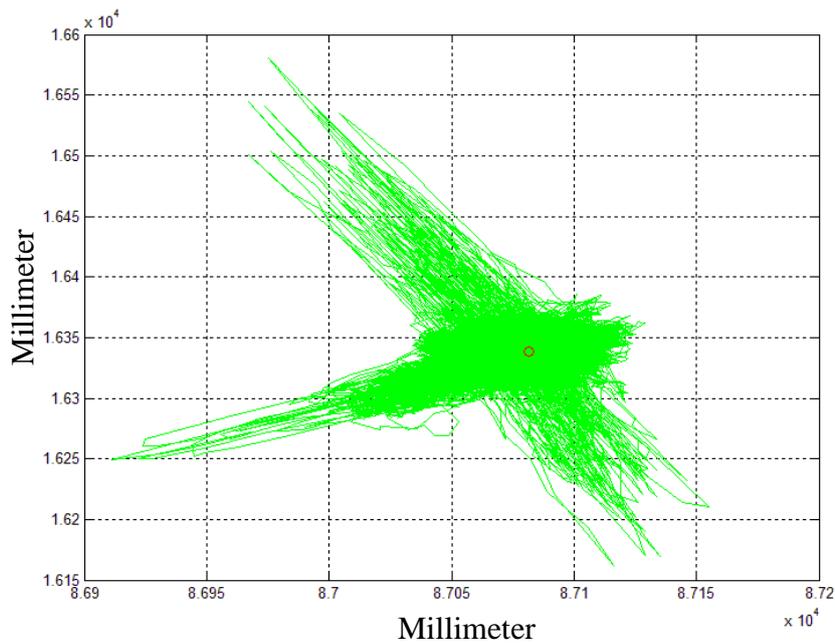


Diagramm 3: LPM Positionsmessung eines stehenden Objektes

Hinzu kommen noch die Schwankungen der relativen Genauigkeit, die bei den statischen Test noch einmal im Bereich von ± 12 cm lagen. Somit kann eine Positionsbestimmung zurzeit nur im Bereich von ± 24 cm (positionsabhängig) durchgeführt werden. Da dieses System ständig weiterentwickelt wird, kann es jedoch für die Zukunft eine sehr gute Lösung für die Positionsbestimmung, bei Tests bei denen Kollisionen zu erwarten sind, in einer aktiven Sicherheitsumgebung darstellen.

DGPS

Die Positionsbestimmung mittels DGPS funktionierte einwandfrei. Die statische Genauigkeit (Aufzeichnung der Position für eine Zeitdauer von 30 Minuten) beträgt ± 2 cm. Es konnten weder Ausreißer noch sonstige Ausfälle erkannt werden. Da die Position aktuell nur 20 mal pro Sekunde bestimmt wird, ist die Steuerung eines Kraftfahrzeugs aber bei höheren Geschwindigkeiten nur schwer möglich.

DGPS plus Inertialplattform

Beim DGPS mit Inertialplattform werden die Daten bis zu 250 mal pro Sekunde ausgegeben. Das DGPS dient lediglich der Korrektur der mittels Beschleunigungs- und Drehratesensoren berechneten Position. Auch dieses Gesamtsystem zeigte eine Genauigkeit im Bereich von ± 2 cm.

6.2 Funkverbindung

Eine weitere benötigte Komponente ist die Funkübertragung zwischen den Fahrzeugen und der Testumgebung, unabhängig vom Positionsmesssystem. Lediglich die zu übertragenden Datenmengen sind stark komponentenabhängig, wie nachfolgend erklärt wird.

- Falls ein LPM System verwendet wird, muss man den jeweiligen Kraftfahrzeugen deren eigenen Position mitteilen, da sich die Auswertesoftware und somit die Positionsdaten auf einem Zentralrechner befinden. Dieser Zentralrechner erhält die Messdaten der am Testgelände fix montierten Basisstation und kann darüber die Positionen der Transponder ermitteln.
- Bei der Verwendung eines satellitenunterstützten Positionierungssystems ist zwar dem jeweiligen Fahrzeug seine eigene Position bekannt, nicht aber die Position der anderen Fahrzeuge. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Positionen einem außerhalb befindlichen übergeordnetem Sicherheitssystem bekannt zu geben, welches mögliche Gefahrensituationen erkennt und darauf entsprechend reagieren kann.

Aus den oben genannten Gründen ist eine Funkverbindung zwischen den Fahrzeugen und der aktiven Sicherheitsumgebung unerlässlich. Die Reichweite der Funkverbindung sollte etwa 500 m betragen (für Realfahrzeuge). Des Weiteren sollten möglichst hohe Datenraten möglich sein um auch Erweiterungen des Systems einfach umsetzen zu können. Einen weiteren entscheidenden Punkt stellt die Übertragungssicherheit, beziehungsweise die Möglichkeit, die Kommunikation zu überprüfen, dar.

6.2.1 WLAN (*Wireless Local Area Network*)

Für die Tests mit den Modellautos sollte die Reichweite von Standard WLAN - Netzen, welche zwischen 100 m und 300 m beträgt, ausreichen. WLAN - Netze sind sehr störanfällig und deshalb lediglich eingeschränkt für den Realbetrieb in der Testumgebung zu empfehlen. Mit speziellen Antennen kann die Reichweite auf 500 m bis 2 km erweitert werden (für Realfahrzeuge). Größere Probleme des Betriebs mit WLAN sind in der Nähe von Siedlungsgebieten und Firmen zu erwarten, die selbst WLAN nutzen. Der große Vorteil sind die extrem hohen Datenmengen, die mittels WLAN übertragen werden können. Diese reichen

auch für den Betrieb mehrerer Fahrzeuge aus. Auch ist es möglich, die Kommunikation zu überwachen.

6.2.2 GSM / GPRS Netz

Der große Vorteil dieser Netze ist die große Reichweite. Die Datenübertragungsrate von GSM (Global System for Mobil Communications) mit 9600 bit/s ist aber für die gewünschte Anwendung zu gering (3 x double Typ 64 Bit (x, y, t), mit 100 Hz übertragen ergibt 19200 Bit ohne Zusatzinformationen). Die Datenübertragungsraten von GPRS (General Packet Radio Service, 55.6 kbit/s) hingegen würden ausreichen, da die Übertragungsraten jedoch von der Netzauslastung abhängig sind, kann auch das GPRS System nur sehr eingeschränkt verwendet werden. Durch diese Unsicherheit scheint GPRS nicht geeignet zu sein. Die Erweiterbarkeit auf mehrere Fahrzeuge stellt aber keinerlei Problem dar.

6.2.3 CB Funkdatenübertragung

Auch beim CB Funk gibt es die Möglichkeit der Datenübertragung. Da die Datenraten jedoch sehr gering sind, wird nicht mehr näher auf dieses System eingegangen.

6.2.4 Datenfunksysteme mit serieller Kommunikation

Datenfunksysteme mit serieller Kommunikation arbeiten in verschiedenen Frequenzbändern (40 Mhz, 868 Mhz). Die Reichweite ist abhängig von der gewünschten Datenübertragungsrate und kann bis zu 10 km betragen. Um jedoch höhere Datenraten zu erreichen, sind lediglich Entfernungen bis 1 km realisierbar. Ein Problem stellt die Erweiterbarkeit dar. Hier müssen entsprechende Systeme hinzugefügt werden, die im gleichen Frequenzbereich senden, sich jedoch nicht stören (Datenübertragungsraten einschränken, etc.). Vor allem als Kommunikation für die NOTAUS Elemente ist diese Art sehr gut geeignet.

6.2.5 Ergebnisse

Ausgehend von den Herstellerangaben erfolgte die Bewertung der Funksysteme in Tabelle 8. Dabei erfüllen lediglich das WLAN und das RS232 Datenfunksystem die gewünschten Anforderungen. Eventuell wird UMTS in Zukunft eine weitere Alternative zu den vorgestellten Möglichkeiten zur Datenübertragung sein. Aufgrund der Vielzahl an

Herstellern solcher Systeme wird nicht näher darauf eingegangen. Die Bewertung erfolgt wie in der Tabelle zuvor, mit einem Symbol „++“ zusätzlich. Dieses bedeutet, dass sich das System in der Kategorie sehr von den anderen Systemen abhebt.

Funksystem	Reichweite	Datenmenge	Kosten	Problem	Ausbaumöglichkeit
WLAN	o	++	+	Nähe zu anderen Netzen	+
GPRS	++	o	o	Netzauslastung	++
CB-Funk	+	-	+		-
RS232 Funk	+	+	o	Sender für zweites Fahrzeug	o

Tabelle 8: Bewertung der Funksysteme

6.3 Steuerrechner

Die Anforderungen an die Steuerungseinheit sind neben der Echtzeitverarbeitung der Daten auch die einfache Montierbarkeit am Modellauto. Weitere Anforderungen an die Einheit sind leichte und kleine Bauweise und die Möglichkeit einer Funkkommunikation. Da die meisten Echtzeitsysteme lediglich mit 230 Volt versorgt werden können, ist gerade die Versorgung des Systems mit Gleichspannung im Bereich von 12 Volt ein entscheidender Punkt. Ein solches System kann in weiterer Folge auch einfach in einem Standardkraftfahrzeug an das Bordnetz angeschlossen werden.

Im Wesentlichen sollte hier jedoch zwischen den Systemen für ein Modellfahrzeug und ein reales Fahrzeug unterschieden werden. Die Anforderungen an die Steuerung eines Modellfahrzeuges sind wesentlich geringer als an die Steuerung eines realen Fahrzeuges. Aufgrund dessen und der Möglichkeit, über Wechselrichter auch im Fahrzeug 230 Volt zur Verfügung zu stellen, sollte in einem realen Fahrzeug auf ein Echtzeitsystem zurückgegriffen werden, welches auch ausreichend Rechenleistung zur Verfügung stellt. Zwar gibt es sehr viele Hersteller von Steuerrechnern, doch vor allem die Einschränkungen von Gewicht, Größe und der Spannung reduzieren die Auswahl stark. Zwei Einheiten, die diese Anforderungen erfüllen sind das CompactRio der Firma National Instruments und die MicroAutoBox von dSPACE. Zwar ist die MicroAutoBox vor allem für den automobilen Bereich ausgelegt und wäre somit beim Einsatz im realen Fahrzeug zu bevorzugen, doch sind für die Steuerung und zukünftigen Erweiterungen am Modellfahrzeug weitere Schnittstellen erforderlich, welche nicht oder nur schwer in die MicroAutoBox integriert werden können.

6.4 Fahrzeugroboter

Einen wesentlichen Bestandteil koordiniert automatisierter Fahrzeuge stellen die Roboter zur Steuerung des Fahrzeuges dar. Diese wurden in der Vergangenheit hauptsächlich zur Durchführung reproduzierbarer Fahrdynamikmanöver verwendet (s. Abbildung 43, Lenkroboter). Um eine effiziente Steuerung auch in Hinblick auf koordiniertes Fahren zu gewährleisten, sind gewisse Randbedingungen bei der Auswahl der Roboter zu berücksichtigen.

Für den Betrieb stellt das maximal zur Verfügung gestellte Moment den entscheidenden Einflussparameter dar. Durch ein hohes Lenkmoment sind beispielsweise dynamische Fahrmanöver realisierbar. Auch können dadurch Lenkkorrekturen schnell an das Fahrzeug weitergegeben werden.



Abbildung 43: Stähle Lenkroboter [39]

Der zweite wichtige Faktor ist die auftretende Stellgeschwindigkeit. Auch diese hat einen Einfluss auf die Regelbarkeit des Fahrzeuges und auch einen wesentlich Einfluss auf die Sicherheitsaspekte. Diese Stellzeiten gilt es in der Simulation unbedingt zu beachten, da es sich dabei quasi um Verzögerungen handelt und diese auch zu ungewollten Kollisionen führen können.

Hersteller solcher Roboter sind beispielsweise Stähle [39], ABD und VEHI.CO [46]. Da die aktive Sicherheitsumgebung jedoch mit Modellfahrzeugen realisiert wird, ist eine Bewertung

und Auswahl von Robotern nicht notwendig. Das Äquivalent zu den Robotern bilden bei den Modellautos der Lenkservo, beziehungsweise der Motorcontroller.

6.5 *NOTAUS-System*

Um Fahrzeuge auch im Fehlerfall sicher zum Stillstand zu bringen, ist die Integration eines umfassenden Notaussystems zu berücksichtigen. Dieses System sollte auch unabhängig von der Standard – Kommunikation aktivierbar sein, um im NOTAUS Fall die notwendigen Schritte einleiten zu können. Die wichtigste Komponente ist dabei eine mechanische Notbremse, die versorgungsunabhängig aktiviert werden kann. Da im NOTAUS Fall die Priorität nicht mehr die Kollisionsvermeidung, sondern lediglich die Energiereduktion ist, sollten weitere Maßnahmen wie eine Spritsperre und dergleichen ins Fahrzeug integriert werden.

7 Hardware einer skalierten Sicherheitsumgebung

Die Hardware wurde so gewählt, dass in Zukunft auch die Ausrüstung eines realen Fahrzeugs lediglich durch die Veränderung, beziehungsweise den Zukauf einzelner Erweiterungen möglich ist. Ebenso wurde darauf geachtet, möglichst Komponenten zu verwenden, die einen einfachen Aufbau auf einem Modellfahrzeug ermöglichen.

7.1 *Modellauto*

Für die Testumgebung wurden zwei Modellautos im Maßstab 1:5 mit Elektromotor angeschafft und modifiziert (s. Abbildung 44). Aufgrund des Elektromotors können die Tests direkt vor dem Institutsgebäude durchgeführt werden, ohne die Umgebung durch die entstehende Geräusentwicklung zu beeinträchtigen. Zwar ist die Energieversorgung eines Elektromodellfahrzeugs im Vergleich zu einem Benzinmodellfahrzeug komplizierter, da jedoch nicht nur für den Antrieb, sondern auch für die Steuerungskomponenten elektrische Energie benötigt wird, ist es ohnehin erforderlich, Reserveakkus bei Tests mitzuführen. Dahingehend stellt also der typische Nachteil eines Elektromodellautos (langsame Aufladung der Akkus) keine Einschränkung für die Testumgebung dar.

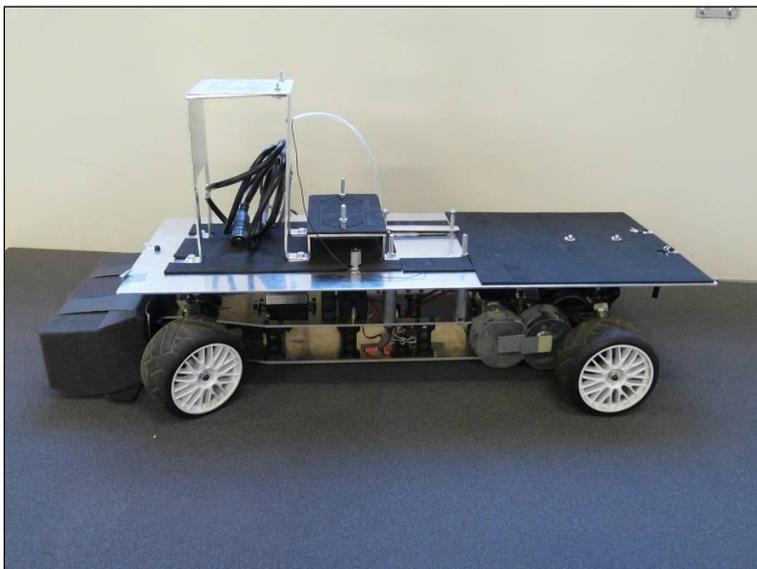


Abbildung 44: Modellauto mit Aufbauten

Bei der Anschaffung der Fahrzeuge waren bereits der Lenkservo, der Motor und der zugehörige Motorcontroller am Modellauto verbaut.

7.2 Positionsmesssystem

Bei den Positionsmesssystemen wurde zugunsten einer DGPS Variante der Firma NOVATEL [31] entschieden. Die Vorteile diese Systems liegen in der Positionsgenauigkeit, in der Möglichkeit zur Erweiterung mit einer Inertialplattform und in der kostengünstigen Anschaffung. Der Nachteil ist die maximal mögliche Anzahl der Positionsbestimmungen (eines DGPS) von 20-mal pro Sekunde, welche jedoch für das Modellauto völlig ausreichen sollte. Als Basisstation wird ein NOVATEL DL-V3 GPS Empfänger (Abbildung 45, rechts) verwendet. Am Modellauto wird ein NOVATEL FlexPak-V2 GPS (Abbildung 45, links) Empfänger montiert, welcher aufgrund des geringen Gewichts und der kleinen Bauweise dafür ideal geeignet ist. Für die Datenübertragung der Korrekturdaten zwischen Basisstation und Rover wird eine serielle Funkübertragung im 2.4 Ghz Bereich verwendet.



Abbildung 45: GPS Receiver FlexPak, Funk-Datenübertragung, GPS Receiver DL-V3

Technische Daten [33]:

DGPS:

FlexPak-V2 , DL-V3

20 Hz Abtastrate

2 cm real-time kinematic positioning (RTK)

Antennen:

Novatel GPS-702-GG

AeroAntenna AT2775-12

7.3 Funkverbindung

Aufgrund der hohen Datenraten und der ausreichenden Reichweite, wurde zugunsten einer WLAN Verbindung zwischen Fahrzeug und Zentralrechner entschieden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass moderne Laptops bereits über WLAN verfügen und auch in der Steuerung bereits ein WLAN System integriert ist. In Abbildung 56 (2) ist einer von drei verwendeten WLAN Access Points für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und dem Zentralrechner dargestellt.

Technische Daten:

Netgear WG302

54 MBit/s Wireless Access Point

Zwei 5dBi Antennen

Verschlüsselung: WEP, WPA

7.4 Steuerungskomponenten

Da National Instruments mit dem CompactRio ein System anbietet, welches alle Anforderungen erfüllt und auch durch modulare Bauweise einfache Erweiterungsmöglichkeiten bietet, wurde zugunsten eines CompactRio Systems (Abbildung 46) entschieden.



Abbildung 46: CompactRio

Dieses beinhaltet neben einem Echtzeitprozessor auch ein „Field Programmable Gate Array“ (FPGA), wodurch weitere Möglichkeiten für eine effiziente Programmierung geschaffen werden.

Technische Daten:

Echtzeitcontroller: cRIO-9014

Serielle Schnittstelle, Usb Anschluss, Ethernet Anschluss

400 Mhz CPU Takt

128 MB DRAM Speicher

2 GB Festplatte

Gehäuse: FPGA

4 Steckplätze

3 Millionen Gatter

TTL Modul: NI 9401

8 Digitale I/O Kanäle

Taktrate 10 Mhz

Serielles Modul: NI 9870

4 serielle RS232- Anschlüsse

Baudrate bis 921,6 kbit/s

7.5 Komplettsystem

Um alle benötigten Bauteile auf dem Modellauto (s. Abbildung 47) befestigen zu können, mussten Änderungen durchgeführt werden. So dient die erhöhte Position im vorderen Bereich der Aufnahme der GPS Antenne. Gleich dahinter wurde der GPS Empfänger und darunter die Funkverbindung zur GPS-Basisstation montiert. Im mittleren Bereich befindet sich die Spannungsversorgung, sowohl für den GPS Empfänger, als auch für die Steuerungshardware. Im hinteren Bereich wurde die Steuerungshardware installiert.

Unter der zusätzlich integrierten Trägerplatte befinden sich die Antriebskomponenten und die dafür notwendige Spannungsversorgung. Im Frontbereich wurde noch Schaumstoff montiert, um bei Kollisionen die auftretenden Beschleunigungen zu reduzieren.

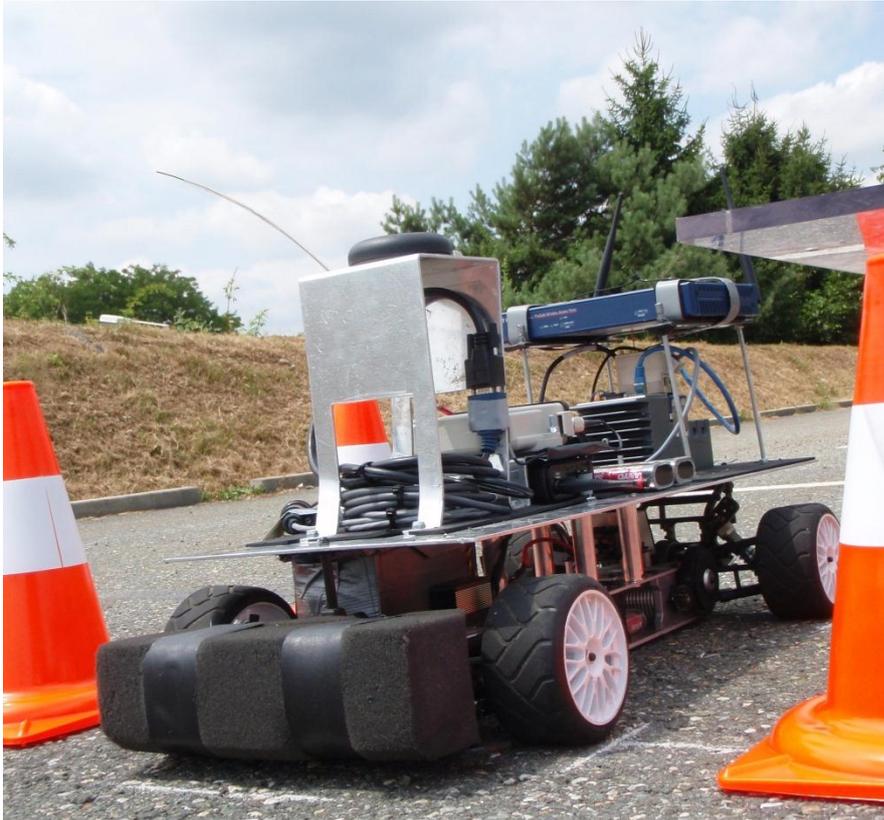


Abbildung 47: Aufgebautes Modellauto

Des Weiteren wurde ein Notauskonzept über die beiliegende Funkfernsteuerung realisiert. Bewegt sich das Fahrzeug aus der Reichweite der Fernsteuerung oder wird die Fernsteuerung ausgeschaltet, wird die Steuerleitung des Motors unterbrochen und das Fahrzeug hält automatisch an.

In Abbildung 48 ist der vollständige Schaltungsplan dargestellt. Die grundsätzliche Bedienung erfolgt mittels Laptop, der über Wlan mit dem Steuergerät (CompactRio) verbunden ist. Die Korrekturdaten der Referenzstation werden mittels Funkmodul an das am Modelauto montierte DGPS übermittelt. Aus den Positionsdaten können im Anschluss die Stellsignale für den Lenkservo und den Motorcontroller ermittelt werden.

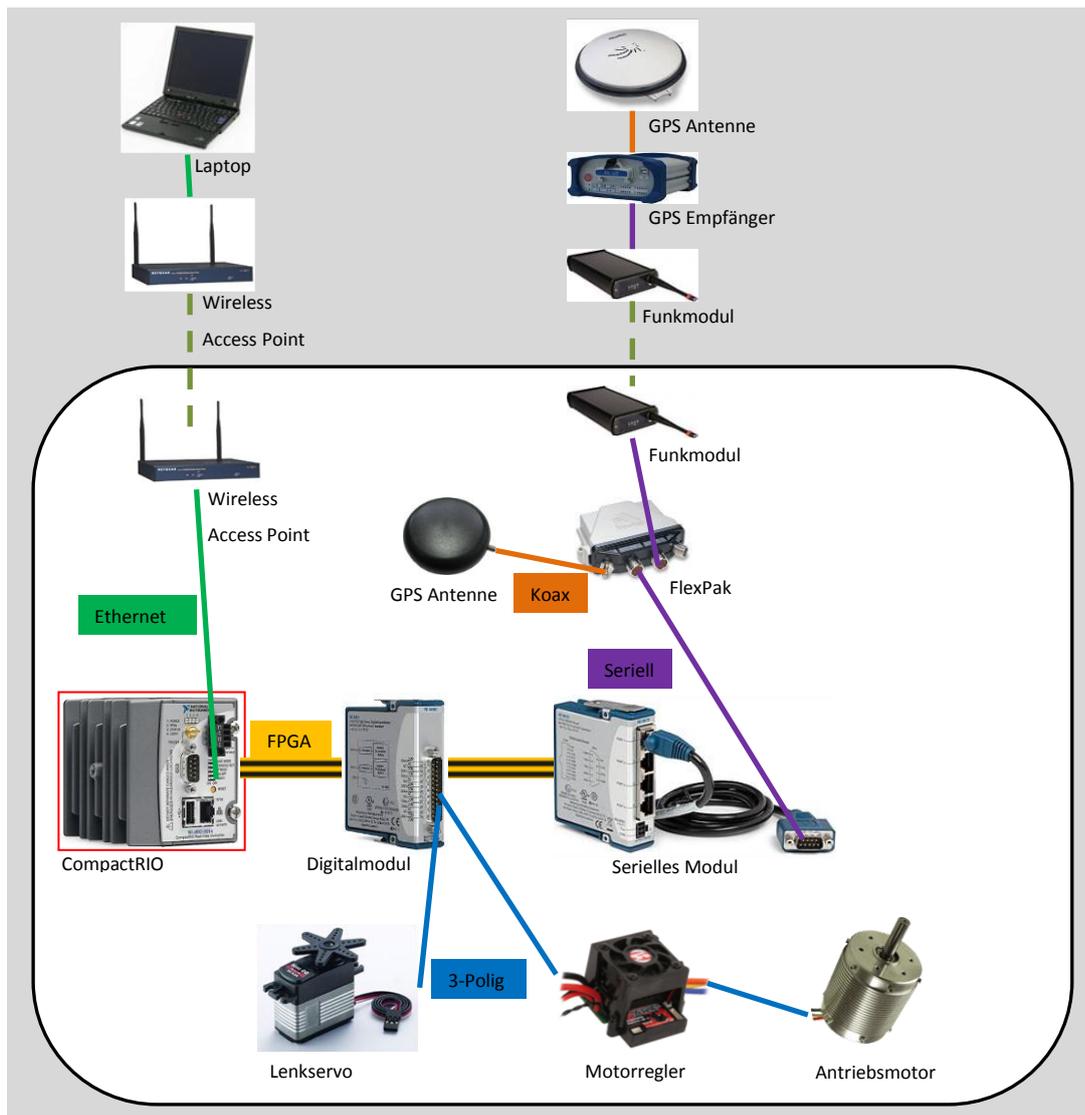


Abbildung 48: Schaltungsplan der aktiven Sicherheitsumgebung [35, 2011]

Mit dem aufgebauten Modellfahrzeug sind verschiedenste Tests durchführbar. Es können über zusätzliche Schnittstellen am CompactRio leicht weitere Steuergeräte am Modellfahrzeug integriert werden. Auch ist eine Montage von Umgebungserkennungssensoren in der dafür vorgesehenen Höhe (Frontstoßstange) durch die GPS Antennenhalterung möglich.

8 Steuerungssoftware einer skalierten, aktiven Sicherheitsumgebung

Diese Steuerungssoftware hat nicht nur die Aufgabe, das Modellauto während eines Tests auf der vorgeschriebenen Trajektorie zu halten, sondern umfasst wesentlich mehr Komponenten (z.B. auch eine Datenaufzeichnung), siehe Diagramm 4. Die Funktionalität der einzelnen Programmteile soll in diesem Kapitel näher beschrieben werden.

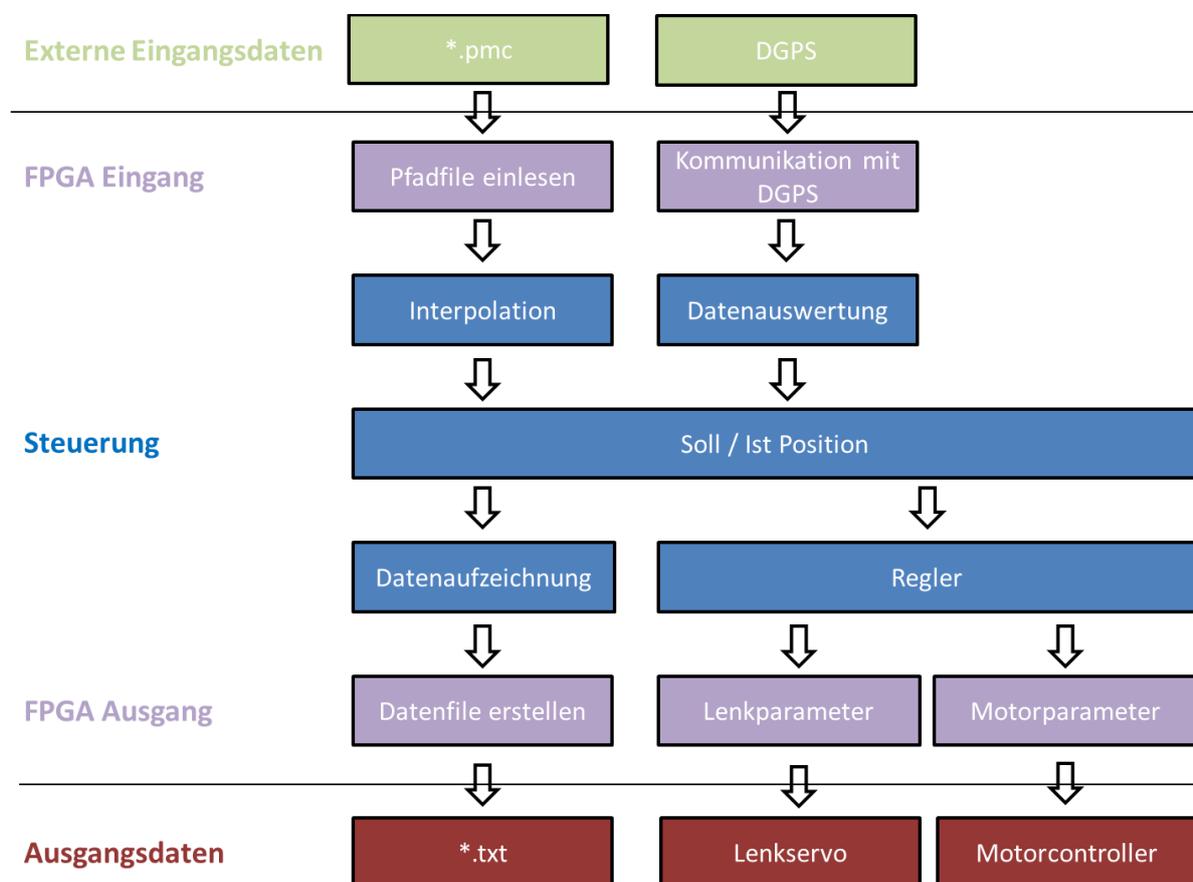


Diagramm 4: Software Ablaufdiagramm

Ein wesentlicher Punkt bei der Programmierung war es, die Programmteile möglichst modular aufzubauen, um Änderungen und Erweiterungen möglichst einfach durchführen zu können. Des Weiteren ist dadurch eine schnelle Integration im realen Fahrzeug, beziehungsweise die Verwendung von Teilen in anderen Anwendungen (UFO, etc.) möglich.

8.1 Steuerungssoftware des Modellautos

Die Programmierung der Steuereinheit erfolgt mit dem Programm LabView 8.5.1 [29]. Zwar kommen prinzipiell auch andere Programmiersprachen wie beispielsweise C++ oder auch Matlab in Frage, doch wurden diese Überlegungen vor allem durch die Wahl des Steuerrechners entschieden. Im Fall des CompactRio handelt es sich dabei vorzugsweise um die Programmiersprache LabView. In LabView werden mittels grafischer Programmierung „Virtuelle Instrumente“ (VI, entsprechen in etwa Funktionen) erstellt. Unter grafischer Programmierung versteht man in diesem Fall die Möglichkeit, Funktionen mittels „Drag and Drop“ in ein VI einzubauen und diese mittels Verdrahtung entsprechend der Logik zu verbinden. Es ist also keine Programmiersprache im herkömmlichen Sinn – eine zeilenbasierte Programmierung – sondern eine Programmierung, bei der eine Art Flussdiagramm entsteht. VI's können wiederum mehrere Funktionalitäten umfassen und sind quasi äquivalent zu Funktionen oder Modulen in herkömmlichen Programmiersprachen. Durch die Verwendung kann eine modulare, übersichtliche Programmierung und eine einfache Erweiterung, beziehungsweise Abänderung von bestehenden Programmteilen erreicht werden.

Durch die grafische Programmierung ist es sehr einfach, parallele Prozesse zu generieren. Da das CompactRio neben einem Echtzeitprozessor auch über einen „Field Programmable Gate Array“ (FPGA) verfügt, kann diese Parallelität teilweise ausgenutzt werden (Filterung von Eingangsdaten, etc.). Mit dem in LabView erstellten Programm werden alle zur Steuerung des Modellautos notwendigen Schnittstellen erfasst und können dadurch angesprochen werden. Die Programmierung des Echtzeitcontrollers und des FPGA's muss über getrennte Programmteile erfolgen, da es sich dabei um zwei unterschiedliche Hardwarekomponenten handelt. Die Kommunikation, beziehungsweise Parameterübergabe erfolgt über Schieberegister. Durch die Verwendung des Schieberegisters werden, unabhängig von der Sendefrequenz der Positionsbestimmung, alle Daten aufgezeichnet und sobald ein Datensatz vollständig ist, an den Programmteil des Echtzeitcontrollers übermittelt. Im Folgenden sollen die einzelnen Komponenten des mit LabView erstellten Programms beschrieben werden.

8.2 Einlesen und Verarbeiten des PC-Crash File

Die Vorgabe des abzufahrenden Weges für das Modellauto erfolgt mittels PMC File. Durch die Verwendung des gemeinsam mit Daimler und ABD definierten Vorgabefiles kann dieses sowohl in den Modellfahrzeugen als auch in den Roboterfahrzeugen von Daimler verwendet werden. Diese PMC Files (Textfiles) übergeben der Steuerungssoftware die Vorgabetrajektorie und beinhalten den zurückgelegten Weg, die dazugehörigen Zeitpunkte und die jeweiligen X- und Y- Positionsdaten. Das Vorgabefile wird am CompactRio des jeweiligen Fahrzeugs gespeichert, aus welchem das in LabView erstellte Programm die benötigten Daten einliest und anschließend für die Trajektorienvorgabe in Form eines Arrays aufbereitet.

8.3 Trajektorienvorgabe

Im Array befinden sich die gesamten Kursdaten (Position, gefahrener Weg, Zeitpunkt). Da die Daten jedoch immer basierend auf dem gefahrenen Weg in konstanten Abständen (z.B. einem Meter) vorliegen, können in der einfachsten Anordnung lediglich diese Daten zur Regelung des Fahrzeugs herangezogen werden.

Die aktuellen Positionsdaten der Fahrzeuge werden mittels DGPS 20 mal pro Sekunde ermittelt. Dies bedeutet beispielsweise bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h, dass die Positionsdaten in 42 Zentimeterschritten (des Kurses) vorliegen. Würde man nun die DGPS Positionsdaten mit den vorgegebenen Positionsdaten (in Meterschritten) vergleichen, lässt sich schnell erkennen, dass die beiden Punkte sehr selten die gleiche Position beschreiben. Um nun dennoch eine Aussage betreffend der Soll- und der Ist-Position tätigen zu können, ist es notwendig, zwischen den Meterabständen der Solltrajektorie zu interpolieren.

Da sich ein Kurs prinzipiell aus Kurven (Gerade ist Kurve mit unendlichem Radius) zusammensetzt, ist eine lineare Interpolation zwischen den einzelnen Punkten nicht zu empfehlen. Es würde bei den Stützpunkten zu Sprüngen in den Sollparametern (Lenkwinkel, Geschwindigkeit) führen. Um diese Sprünge zu vermeiden, können die Kurve über Polynome angenähert werden. Da die geplanten Trajektorien aber auch über 1000 Meter lang sein können und entsprechend 1000 Punkte besitzen, ist die Interpolation mittels eines einzigen Polynoms (um alle Stützstellen zu berücksichtigen: Polynom Ordnung 1000) auch nicht zu empfehlen. Der Ausweg sind Spline Kurven, welche in weiterer Folge beschrieben werden sollen.

Spline Interpolation [18, 1992]:

Die Punkte, zwischen denen interpoliert werden soll, werden Stützpunkte (mit Parameter t_i) genannt. Mittels Spline Kurven kann ein beliebig großer Kurs in einzelne Kurvenstücke zerlegt werden (wenige Stützpunkte), für welche die Interpolation einfacher durchgeführt werden kann. Weiters wird angenommen, dass die Ordnung der Funktion zwischen den Stützpunkten (z.B. 3. Ordnung für Bahnkurven von Fahrzeugen, höhere Ordnung für hochdynamische Prozesse) bekannt ist. Somit gilt es, lediglich die Parameter (A, B, C, D) der Funktion zu errechnen.

$$X_i(t) = A_i \cdot (t - t_i)^3 + B_i \cdot (t - t_i)^2 + C_i \cdot (t - t_i) + D_i \quad 8-1$$

Dies ist eine gängige Methode um beliebige Verläufe zwischen zwei Punkten zu interpolieren. Im konkreten Fall wurde die Kurve in jeweils sechs Segmente mit jeweils einem Meter Länge zerlegt, welche aus kubischen Funktionen bestehen. Die kubischen Funktionen bilden Fahrtrajektorien sehr gut ab und wurden deshalb ausgewählt. Für die Regelung ist es notwendig, sowohl die X als auch die Y Koordinaten mittels separaten Spline zu interpolieren. Als Basis dient bei der Interpolation die konstante Schrittweite. Um auch eine Regelung hinsichtlich der Zeit, beziehungsweise der Geschwindigkeit zu ermöglichen, ist es auch notwendig, die Zeitschritte zu interpolieren. Für alle Größen können die gleichen Formeln für die Berechnung der kubischen Funktionen benutzt werden. Die verwendeten Gleichungen werden in der Folge erläutert.

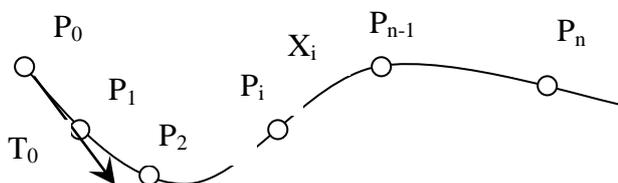


Abbildung 49: Spline Schema

Die Punkte $P(x)$ in Abbildung 49 symbolisieren sowohl die Koordinaten, als auch die Zeitpunkte zwischen welchen es zu interpolieren gilt. P_i steht für den aktuellen Punkt, X_i für die zu berechnende kubische Funktion. P_n entspricht in diesem Fall 6 da immer sechs Segmente (ein Segment = Weg zwischen zwei Punkten) betrachtet werden. T_0 ist die Anfangstangente im Punkt P_0 . Unter der Anforderung, dass die Splinekurven in den Punkten

zweimal stetig differenzierbar sind, gilt es folgende Gleichungen zu lösen und die Parameter (A, B, C, D) der kubischen Funktionen zu ermitteln.

$$X_i(t_i) = P_i = D_i \quad 8-2$$

$$X'_i(t_i) = P'_i = C_i \quad 8-3$$

$$X_i(t_{i+1}) = P_{i+1} = A_i \Delta t_i^3 + B_i \Delta t_i^2 + C_i \Delta t_i + D_i \quad 8-4$$

$$X'_i(t_{i+1}) = P'_{i+1} = 3A_i \Delta t_i^2 + 2B_i \Delta t_i + C_i \quad 8-5$$

Der Vektor D_i entspricht den Koordinatenpunkten, beziehungsweise den Zeitpunkten. Werden die Formeln 8-2 bis 8-5 aufgelöst, so ergibt sich hinsichtlich A_i bzw. B_i :

$$A_i = \frac{1}{(\Delta t_i)^3} [2(P_i - P_{i+1}) + \Delta t_i (P'_i + P'_{i+1})] \quad 8-6$$

$$B_i = \frac{1}{(\Delta t_i)^2} [3(P_{i+1} - P_i) - \Delta t_i (2 * P'_i + P'_{i+1})] \quad 8-7$$

Werden sowohl 8-2 und 8-3 als auch 8-6 und 8-7 in 8-1 eingefügt, so ergibt sich die sogenannte Ferguson-Darstellung [15, 1964].

$$\begin{aligned} X_i(t) = & P_i \left(2 \frac{(t - t_i)^3}{(\Delta t_i)^3} - 3 \frac{(t - t_i)^2}{(\Delta t_i)^2} + 1 \right) \\ & + P_{i+1} \left(-2 \frac{(t - t_i)^3}{(\Delta t_i)^3} + 3 \frac{(t - t_i)^2}{(\Delta t_i)^2} \right) \\ & + P'_i \left(\frac{(t - t_i)^3}{(\Delta t_i)^2} - 2 \frac{(t - t_i)^2}{\Delta t_i} + (t - t_i) \right) \\ & + P'_{i+1} \left(\frac{(t - t_i)^3}{(\Delta t_i)^2} - \frac{(t - t_i)^2}{\Delta t_i} \right) \end{aligned} \quad 8-8$$

Wird diese Formel zwei Mal abgeleitet und anschließend unter Berücksichtigung der Forderung $X''_{i-1}(t_i) = X''_i(t_i)$ rekursiv eingesetzt, ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \Delta t_i P'_{i-1} + 2(\Delta t_{i-1} + \Delta t_i) P'_i + \Delta t_{i-1} P'_{i+1} \\ = 3 \frac{\Delta t_{i-1}}{\Delta t_i} (P_{i+1} - P_i) + 3 \frac{\Delta t_i}{\Delta t_{i-1}} (P_i - P_{i-1}) \end{aligned} \quad 8-9$$

Für die sechs Segmente wird ein natürlicher Spline gefordert, bei welchem der Spline in den Punkten 0 und 5 fixiert wird und außerhalb als Gerade verläuft. Der Zusammenhang zwischen D_i und C_i kann nun unter Berücksichtigung von $\Delta t_i = 1$, wie in Formel 8-10 folgt, beschrieben werden.

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix} \quad 8-10$$

Auf die Fahrzeugbewegung bezogen bedeutet dies, dass sich das Fahrzeug in einer geraden Linie auf den ersten Punkt zubewegt. Um einen möglichst fließenden Verlauf der gesamten Trajektorie zu erhalten, werden lediglich die ersten drei Segmente für die weiteren Berechnungen herangezogen. Für alle weiteren Blöcke mit sechs Segmenten wird ein Zusammenhang gewählt bei welchem die Tangente T_0 im Punkt 0 vorgegeben wird. Da aus der ersten Berechnung die Tangenten für die Segmente vier bis sechs berechnet werden, ist es lediglich notwendig diese einzusetzen.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} T_0 \\ P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix} \quad 8-11$$

Es werden also aus den Gleichungen immer nur die ersten drei Segmente für die Parameterbestimmung herangezogen. Die restlichen drei Segmente dienen lediglich der Glättung der Übergangspunkte.

Nach Bestimmung der Faktoren C_i und D_i können auch die beiden restlichen Faktoren A_i und B_i der kubischen Funktion ermittelt werden.

$$A_i = 2 * (P_i - P_{i+1}) + (P'_i + P'_{i+1}) \quad 8-12$$

$$B_i = 3 * (P_{i+1} - P_i) - (2 * P'_i + P'_{i+1}) \quad 8-13$$

Ausgehend von den berechneten Parametern wird eine Matrix mit allen Faktoren der kubischen Splines erstellt, wodurch es möglich ist, für jeden beliebigen Wegpunkt die zugehörigen X- und Y-Koordinaten und den zugehörigen Zeitpunkt zu ermitteln. Dieser Programmteil (Abbildung 50) wurde so geschrieben das beliebige konstante Schrittweiten verwendet werden können.

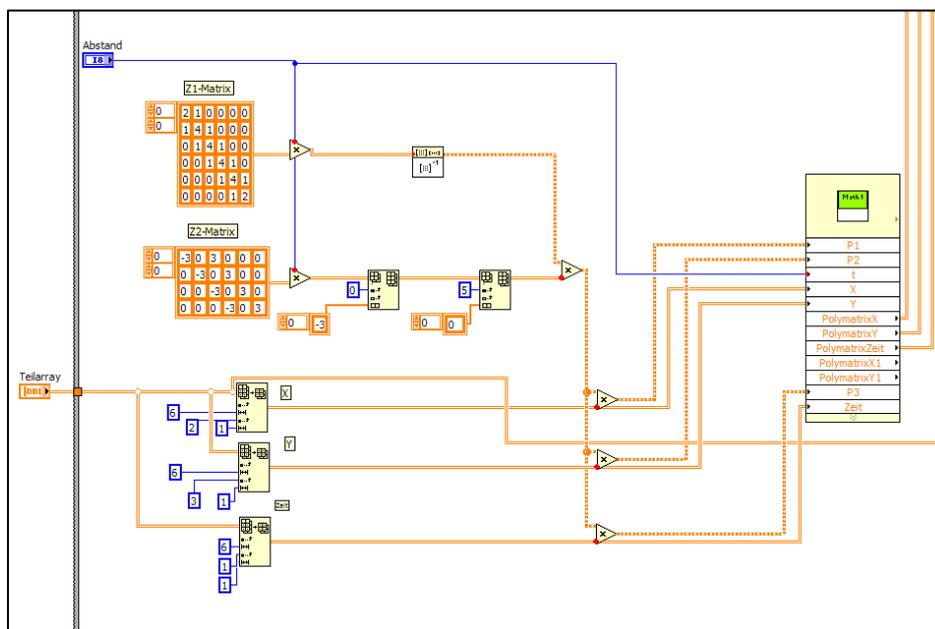


Abbildung 50: Teil der Funktion zur Berechnung der Spline Faktoren

Sollte es aus, bis zu diesem Zeitpunkt, nicht erfassbaren Gründen notwendig sein, auf variable Schrittweiten umzusteigen, ist eine Umprogrammierung der Formeln wie in „Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung“ [18, 1992] beschrieben, erforderlich.

8.4 Erfassen der Positionsdaten (DGPS)

Ein weiterer zentraler Punkt der Software ist, die Programmierung der seriellen Schnittstelle für die Erfassung der Positionsdaten (s. Diagramm 4: Kommunikation mit DGPS und Datenauswertung). Zwar besitzt das CompactRio eine serielle Schnittstelle am Echtzeitcontroller, um jedoch einen Datendurchsatz zu ermöglichen, welcher auch für zukünftige Anwendungen ausreichend ist (Positionsdaten für Kfz, 100 mal pro Sekunde),

wurde am CompactRio ein zusätzliches serielles Modul installiert. Alle zusätzlich verwendeten Module können nur über den FPGA angesprochen werden. Die Programmierung der Kommunikationsschnittstelle erfolgt im FPGA Hauptprogramm. Dabei werden die übertragenen Daten so aufgeteilt, dass lediglich die Datensatzparameter an das Schieberegister weitergegeben werden. Diese Daten, welche neben den benötigten Koordinaten und der Zeit auch noch zusätzliche Informationen wie den aktuellen Fehler in Längs- und Querrichtung oder die Anzahl der Satelliten beinhalten, werden in Stringform an den Echtzeitcontroller weitergeleitet. Das Teilprogramm „Str Pos“ beinhaltet eine Suchfunktion, welche die Stringdaten filtert und in ein numerisches Datenformat umwandelt. Durch die Einbindung des Teilprogramms in die hochpriorisierte Schleife (wird im Programmcode vorgegeben, höchste Priorität wird immer abgearbeitet mit Vorgabegeschwindigkeit → echtzeitfähig) wird diese nur gestartet, wenn neue Daten vorhanden sind. Die Schleife wird also aktuell 20 mal pro Sekunde durchlaufen.

8.5 Speicherung relevanter Daten

Für die Speicherung von Daten werden diese in der hochpriorisierten Schleife an ein Schieberegister übergeben, welches in einer Schleife mit niedriger Priorität wieder ausgelesen wird. Dies ist notwendig, da das Schreiben eines Textfiles durchaus längere Zeit in Anspruch nehmen kann und vor allem auch nicht zeitkritisch durchgeführt werden muss.

Das VI „Data READ“ lädt die Positionsdaten im „NPL“ Programmbereich und übergibt diese weiter an das VI „File I/O Module“, welches die Daten in einem Textfile abspeichert, um eine nachträgliche Überprüfung der abgefahrenen Strecke zu ermöglichen.

8.6 Steuersignale für Servos und Programmierung des TTL Ausgangs

Bei den Steuersignalen für die Ansteuerung der Lenkung und des Geschwindigkeitsreglers handelt es sich um typische Signale in der Modellbautechnik. Die Ansteuerung erfolgt mittels dreier Leitungen, einer Masseleitung (braun), einer Versorgungsleitung (rot) und einer Steuerleitung (orange). Die Versorgung wird mit 5 Volt gewährleistet. An der Steuerleitung liegt ein pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) mit einer Frequenz von 50 Herz und 5 Volt Spitze. Der High Puls hat in der Nullstellung eine Breite von zirka 1.5 ms, die maximale Auslenkung der Servos wird durch Variation der Breite um 0.5 ms erreicht (zum Beispiel die 2 ms wie in Diagramm 5).



Abbildung 51: TTL Modul

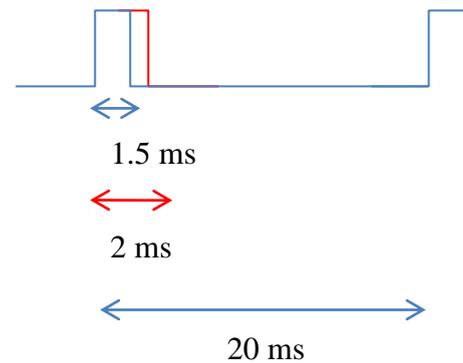


Diagramm 5: Servostellsignal

Um diese Signale mittels CompactRio erzeugen zu können, ist es notwendig, ein zusätzliches Modul (Abbildung 51) zu integrieren. Dabei handelt es sich um ein Transistor Transistor Logik (TTL) Modul. Mit diesem Modul können digitale Zustände erkannt und erzeugt werden (I/O, Input/Output). Die Versorgungsspannung bei TTL beträgt 5 Volt, die Schaltzyklen können im Mykrosekundenbereich gewählt werden.

Auch bei diesem Modul erfolgt die Verarbeitung der Parameter im VI „FPGA_MAIN“, da auch dieses Modul mittels FPGA angesprochen werden muss. Die Vorgabe der Stellwerte für den Lenkservo und den Motorcontroller erfolgt ohne Schieberegister, da es sich dabei jeweils um einen Wert handelt, der an den FPGA übergeben werden muss.

Zwar werden beide Servos mit den selben Steuersignalen gespeist, dennoch sind die Steuerung des Lenkservos und des Motorcontrollers getrennt zu betrachten. Beim Lenkservo sollte die Steuerung möglichst so erfolgen, dass auf einfache Weise den Rädern der Lenkeinschlag in Grad vorgegeben werden kann, da diese Daten auch aus der PC-Crashsimulation ausgelesen werden können. Beim Motorcontroller hingegen wäre es ideal, direkt die gewünschte Geschwindigkeit vorzugeben. Besonders die Anpassung zwischen dem PC-Crash Modell und dem realen Modellauto stellt ein Problem dar. So sollte das PC-Crash Modell möglichst realistisch das Modellauto darstellen, damit die ausgegebenen Geschwindigkeiten und Lenkwinkel auch in der Realität möglichst genau nachgestellt werden können. Der dafür notwendige Programmcode ist im VI „TCL“ integriert worden.

8.7 Lenkservo

Für einen ersten Abgleich zwischen Lenkwinkel der Räder und Steuersignal wird das Steuersignal variiert und die an den Rädern auftretenden Winkel gemessen. Dazu wird die Nullstellung und die weiteren Stellungen der Räder auf einem Papier markiert, auf welchem dann die Winkel messbar sind. Diese Winkel werden anschließend in einem PC-Crash File dazu verwendet, Szenarien zu erstellen, bei denen das Modellauto einen Kreis abfährt. Der Durchmesser, der sich in der Simulation ergibt, wird mit dem Realversuch verglichen und das Modell entsprechend verfeinert. Als letztes werden Kreisversuche in PC-Crash erstellt und diese anschließend in real getestet. Mit diesen abschließenden Tests wird nun nochmals die Steuersoftware verfeinert, um das PC-Crash Modell und das Lenkverhalten des Modellautos möglichst identisch zu gestalten.

Die Schwierigkeit bei diesem Abgleich kommt dadurch zustande, dass Fahrzeuge in der Realität bei den lenkenden Rädern unterschiedliche Einschlagwinkel besitzen (ACKERMANN [27, 1990]). So ist es zwar einfach, beliebige Kraftfahrzeuge zu simulieren (Lenkgeometrie), da das Modellauto jedoch über eine andere Lenkgeometrie verfügt (lediglich ein Gestänge welches durch die Rotation des Servos die Radwinkel ändert, s. Abbildung 53), ergeben sich Probleme, die Manöver des Modellautos mittels Steuerung nachzubilden.



Abbildung 52: Lenkservo

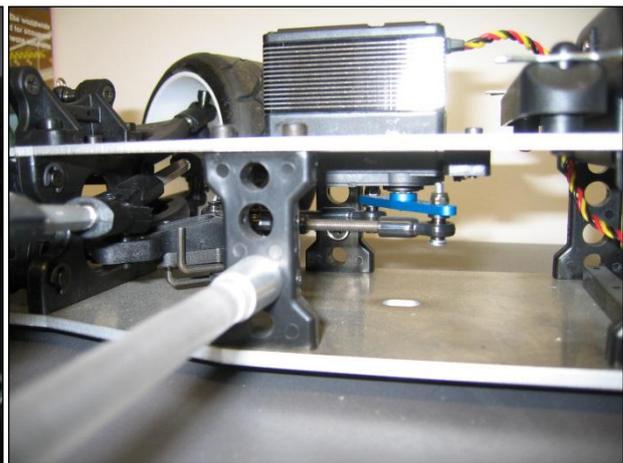


Abbildung 53: Lenkgestänge

8.8 *Motorcontroller*

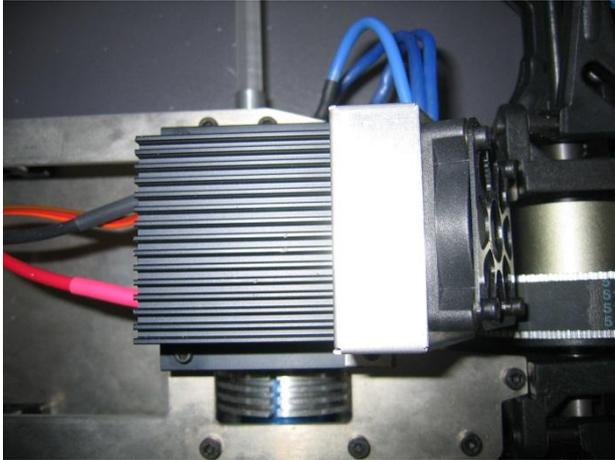


Abbildung 54: Motorcontroller

Ein ähnliches Problem wie bei der Ansteuerung des Lenkservos ergibt sich bei der Ansteuerung des Motorcontrollers (Abbildung 54, Lüfter und Kühler des Motorcontrollers). Das Eingangssignal liefert eine Gasstellung zwischen 0 und 100 Prozent. Die Geschwindigkeit ist leider keine einfache Funktion der Gasstellung und so müssen auch hier einige Versuche durchgeführt werden um eine Annäherung zu erzielen. Ein weiteres Problem stellt das Überwinden der Massenträgheit (Wegfahren) dar. Dazu wird gleich zu Beginn, aufgrund des erhöhten Gewichts, mehr Gas benötigt, um das Modellauto in Bewegung zu setzen.

Die Kalibrierung des Motorcontrollers erfolgt über Versuche mit unterschiedlichen Gasstellungen und dem Abfahren einer Geraden. Am Ende diese Geraden befindet sich eine unabhängige Geschwindigkeitsmessung. Zusätzlich zu dieser Geschwindigkeitsmessung wird die Geschwindigkeit über DGPS Daten ermittelt. Daraus ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Gasstellung und Modellautogeschwindigkeit.

8.9 *Kalibriertest mittels verschiedener Szenarien*

Für die Kalibrierung, werden die in Folge beschriebenen Tests mit den Modellautos auf einer abgesperrten Teststrecke (Parkplatz) durchgeführt.

8.9.1 Kreis (verschiedene Durchmesser)

Es werden mehrere Kreisfahrten für das Modellauto, mit unterschiedlichen Lenkeinschlägen (max. Lenkeinschlag 25°) und konstanter Geschwindigkeit geplant. Nach dem Test erfolgt ein Abgleich der realen Parameter mit den Planungsparametern aus PC-Crash. Die reale Spur wird mittels DGPS aufgezeichnet.

Lenkeinschlag	Kreisdurchmesser
15°	5,1 m
20°	3,5 m
25°	2,7 m

Tabelle 9: Lenkeinschlag – Kreisdurchmesser des Modellfahrzeugs

Im Diagramm unten sind die mit DGPS aufgezeichneten Positionsdaten dargestellt. Die Achsen sind jeweils in Metern angegeben. Mit diesen Werten erfolgt nun ein Abgleich zwischen Planungstool und realem Verhalten. Es sind jeweils mehrere Runden gefahren worden, um auch die Streuung bewerten zu können. Zwar sind die Spuren nicht deckungsgleich, da nur der Lenkwinkel vorgegeben wird, doch bleiben die Durchmesser nahezu konstant. Selbst beim blauen Kreis werden rechts oben und links unten immer wieder dieselben Punkte durchfahren.

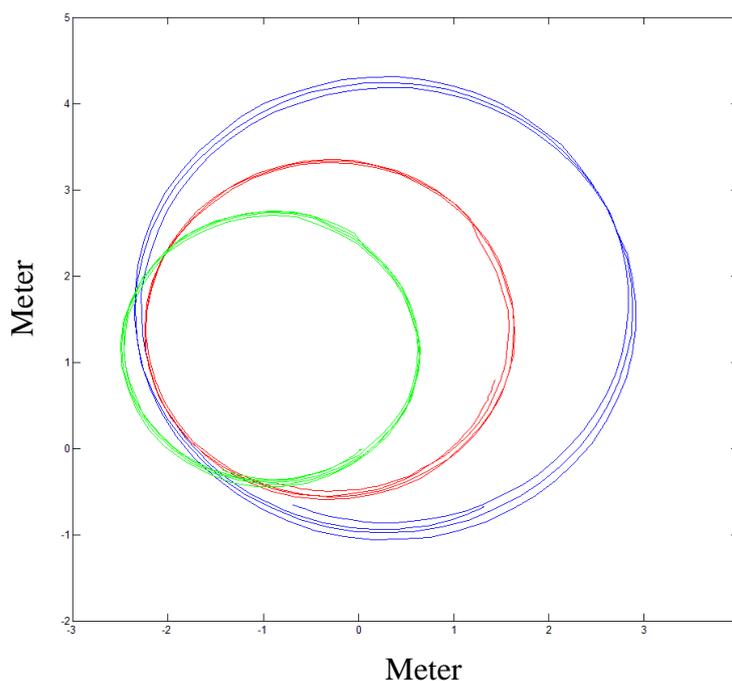


Diagramm 6: Kreisfahrt

8.9.2 Gerade (verschiedene Geschwindigkeiten)

Das Modellauto wird bei diesen Versuchen beschleunigt und fährt anschließend kurzzeitig mit konstanter Gasstellung. Nach dieser Konstantfahrt wird die Geschwindigkeit mittels zweier Laserlichtschranken, die sich im Abstand von einem Meter längs zur Fahrtrichtung befinden, ermittelt. Die Tests wurden mit einer Laserlichtschranke der Firma Tag Heuer [42] durchgeführt. Die Testanordnung ist in Abbildung 55 ersichtlich. Im Anschluss an diesen Test sollen die Geschwindigkeits- und Gasparameter abgeglichen werden.



Abbildung 55: Geschwindigkeitstest

Beim Test wurden jeweils die Durchfahrtszeitpunkte notiert. Aus dem Abstand und der Zeitdifferenz wird die Geschwindigkeit berechnet. In der folgenden Tabelle sind die erfassten Messdaten aufgelistet. Der Abstand zwischen den beiden Lichtschranken beträgt immer genau einen Meter.

Gasstellung [%]	Zeit 1 [s]	Zeit 2 [s]	Zeitdifferenz [s]	Geschwindigkeit [km/h]
20	56.703286	57.197876	0.49459	7.28
30	19.748844	20.036362	0.287518	12.52
40	41.14824	41.3425	0.19426	18.53
50	26.483482	26.629554	0.146072	24.65
50	49.863118	50.009332	0.146214	24.62
50	39.591758	39.737014	0.145256	24.78
60	50.09995	50.233892	0.133942	26.88
70	59.655232	59.784389	0.129157	27.87

Tabelle 10: Gasstellung – Geschwindigkeitstabelle des Modellfahrzeugs

Die drei Versuche bei 50 % Gasstellung (

Tabelle 10) zeigen eine sehr geringe Streuung. Aus dieser Tatsache heraus kann bereits in der Steuerung eine Geschwindigkeit vorgegeben werden. Weiters zeigt sich im Diagramm (Diagramm 7) der Geschwindigkeit über die Gasstellung bis 50 % ein nahezu linearer Verlauf. Auch dadurch lässt sich eine Vorhersage in diesem Bereich erleichtern.

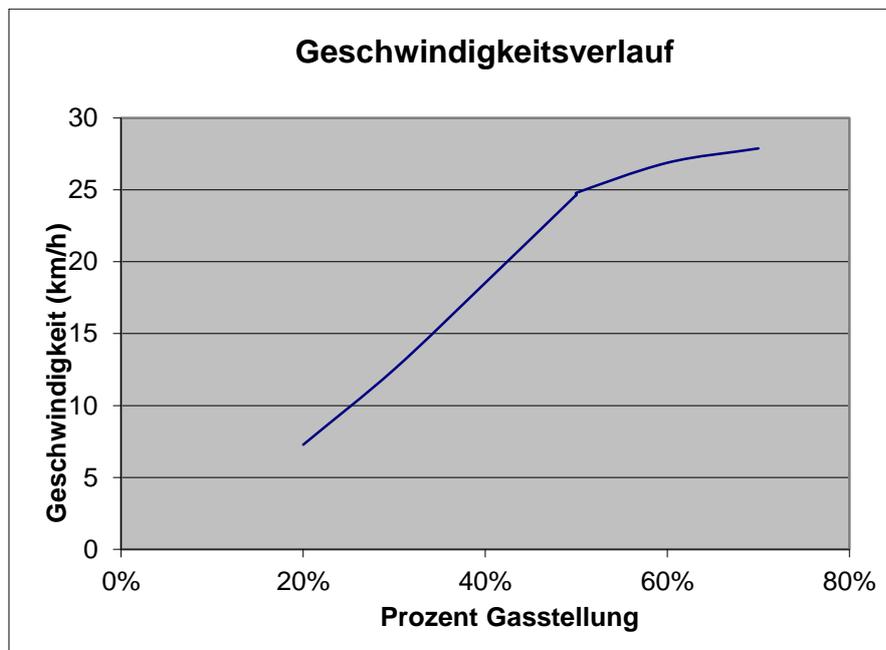


Diagramm 7: Gasstellung – Geschwindigkeit

Mit Hilfe der aus den Kalibriertests gewonnenen Parameter ist es möglich, dem Modellauto bei manuellem Betrieb sowohl Lenkwinkel, als auch Geschwindigkeiten vorzugeben. Die Umrechnung der Lenkwinkel und Geschwindigkeiten in Stellsignale für den Lenkservo und den Motorcontroller können automatisiert vom FPGA ausgeführt werden. Weiters erleichtert diese Umrechnung (in Lenkwinkel und Geschwindigkeit) auch die Auslegung der Regler für einen automatisierten Betrieb.

9 Regelung des Modellautos

Das Hauptaugenmerk bei der automatisierten Testumgebung mit Modellfahrzeugen liegt bei Komponententests. Diese müssen vor allem reproduzierbar gefahren werden können. Geringe Abweichungen zwischen dem geplanten Kurs und dem reproduzierbar gefahrenen Kurs können durchaus vernachlässigt werden. Die Streuung in Hinblick auf die Reproduzierbarkeit sollte in Bereichen mit geringer Dynamik (also nicht Kurven Ein-, Ausfahrten, etc.) ± 5 cm nicht überschreiten. Dies gilt sowohl longitudinal als auch lateral. Die Realisierung dieses Wunsches ist natürlich sehr stark vom Geschwindigkeitsbereich abhängig, für welchen die Anforderungen zu erfüllen sind. Prinzipiell erreicht das Modellfahrzeug eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. Mit dieser Geschwindigkeit wären Tests in Stadtszenarien realisierbar, Test im ländlichen Raum, beziehungsweise auf Autobahnen können nicht simuliert werden. Des Weiteren ist bei Realgeschwindigkeiten auch der Platzbedarf und Sicherheitsanspruch gleich groß wie bei Tests mit Realfahrzeugen, somit wäre bei Verwendung von Modellfahrzeugen nur noch der Vorteil geringerer Kosten der Testfahrzeuge vorhanden, da sowohl Sicherheitsmaßnahmen als auch die Teststrecke gleich Tests mit Realfahrzeugen sein müssen. Um jedoch auch die Größenvorteile der Modellfahrzeuge zu nützen, können Tests in einem skalierten Maßstab realisiert werden. Durch diese Skalierung ergeben sich fahrdynamisch, platzbedarfsmäßig und hinsichtlich von Sicherheitsanforderungen viele Vorteile. Bei der Skalierung wird die Zeit konstant gehalten (die Dauer eines geplanten Realtest entspricht der Dauer des skalierten Tests) und die übrigen Parameter entsprechen angepasst (es wäre auch möglich beispielsweise die Geschwindigkeit konstant zu halten, dann würde der skalierte Test schneller ablaufen).

Beispiel Maßstab 1:5

Durch den Maßstab werden Längen 1:5 skaliert. Da die Zeit konstant gehalten wird, werden auch Geschwindigkeiten mit 1:5 skaliert. Ausgehend von den skalierten Geschwindigkeiten werden auch die Beschleunigungen mit 1:5 skaliert. Diese Parameter spielen hinsichtlich Platzbedarf und Sicherheit die entscheidende Rolle. So reduziert sich beispielsweise ein Test mit 100 km/h auf unkritische 20 km/h. Auch hinsichtlich Beschleunigungen ist die Skalierung ein Vorteil, da ein Realmanöver mit 5 m/s^2 Querschleunigung im Maßstab lediglich 1 m/s^2 aufweist, die Erdbeschleunigung jedoch immer konstant ist (\rightarrow es sind skaliert die selben Querschleunigungen erreichbar wie mit Realfahrzeugen \rightarrow umgerechnet auf das Realfahrzeug 5 fach höhere Grenzgeschwindigkeit).

Dieses Beispiel zeigt aber auch gleichzeitig die Einschränkungen einer skalierten Testumgebung. So sind realistische Manöver im Grenzbereich, beispielsweise mit der Fahrdynamikregelung ESP, aus denen Informationen für Realfahrzeuge gewonnen werden können, nicht möglich. Vor den Tests muss überprüft werden, ob die gewünschten Ergebnisse durch Skalieren erzielt werden können. Da die Testumgebung aber vor allem für skalierte Tests Verwendung finden soll, ist ein Geschwindigkeitsbereich bis maximal 30 km/h (bezogen auf real 150 km/h) vorgegeben.

Basierend auf diesen Anforderungen wird eine Recherche zu möglichen verwendbaren Regleralgorithmen durchgeführt.

9.1 Recherche: Regelungsalgorithmen für die Fahrzeugführung

Da das Interesse der Automobilindustrie in den letzten Jahren ausgehend von der Fahrzeuglängsführung (Tempomat, Abstandsregeltempomat, etc.) nun auch die Fahrzeugquerführung (Spurhalteassistent, etc.) umfasst, ist es durchaus nachvollziehbar, dass sich sehr viele Arbeiten mit dem Thema der automatisierten Fahrzeugführung beschäftigen. Die folgenden Arbeiten sollen einen Überblick über den Stand der Technik liefern. Von besonderem Interesse sind auch die beiden ausgewählten Dissertationen, da beide in Realfahrzeugen integriert getestet wurden und so als Wissensbasis dienen.

Bereits 2001 erschien das Buch „Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung von ROBERT MAYR [24, 2001]. Darin werden Projekte vorgestellt, die sich mit der Fahrzeugführung im hochrangigen Straßennetz befassen. Als Beispiele seien hierfür das Projekt „PATH“ [5] für Amerika und die Projekte „PROMETHEUS“ und „DRIVE“ für die Europäische Union angeführt. Des Weiteren wird in diesem Buch auch auf die Möglichkeit der Fahrzeug Längs- und Querführung und sogar auf automatisierte Spurwechsel und Überholmanöver eingegangen.

Als weiteres Beispiel sei die Dissertation „Integrierte Längs- und Querführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung“ von THOMAS EIGEL [11, 2009] angeführt. In dieser Arbeit geht es um die Entwicklung eines Assistenzsystems, das den Fahrer sowohl auf Autobahnen, als auch auf gut ausgebauten Landstraßen bei der

Fahrzeugführung unterstützen soll. Dazu entwirft der Autor im ersten Schritt zwei unabhängige Regelungssysteme für Längs- bzw. Querführung und im zweiten Schritt eine integrierte Regelung mit Sliding-Mode-Reglern. Diese Regler werden in abschließenden Fahrversuchen validiert.

Eine weitere interessante Arbeit zum Thema Fahrzeugführung ist die Dissertation „Autonomes Fahren mit Hilfe der Magnetechnik“ von CARSTEN MARKGRAF [23, 2002]. Auch in dieser Arbeit geht es um die Fahrzeugführung entlang eines vorgegebenen Kurses. Hier wird die Position des Fahrzeuges mit Hilfe von in der Fahrbahn eingelassenen Permanentmagneten bestimmt. Die Regelung erfolgt teils mit kontinuierlichen Reglern (PID, PD, etc.), wobei in dieser Arbeit auch verschiedene Kombinationen dieser Regler untersucht wurden. Auch aufwendigere Regler wurden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit mittels Simulationen für die Fahrzeugführung überprüft. Abschließend wurden die verschiedenen Reglerverfahren noch mittels Fahrzeug auf einer Erprobungsstrecke verifiziert.

Aus der Vielzahl an Regelungsalgorithmen sollen in dieser Arbeit möglichst einfache (geringer Platzbedarf, nicht rechenintensiv) Regler zur Anwendung kommen, mit Hilfe derer das Modellauto in einem kleinen Geschwindigkeitsbereich vor allem reproduzierbare Tests durchführen kann. Deshalb wird in weiterer Folge nur kurz auf die verwendeten Regler eingegangen welche mittels PI-Anteilen realisiert wurden.

Bevor jedoch mit dem Reglerentwurf begonnen werden kann gilt es, Spezifikationen für die Testumgebung mit Modellfahrzeugen festzulegen. Damit wird ein mathematisches Modell des Modellautos gebildet, mit welchem eine Auslegung der Regler einfacher durchführbar ist. Im zweiten Schritt werden die entworfenen Regler ins Modellauto integriert und hinsichtlich der Vorgaben bewertet.

9.2 Modellparameter

Abstand Schwerpunkt zu hinterem Ende des Gesamtfahrzeuges = 35 cm

Abstand Schwerpunkt zu Vorderachse = 31 cm

Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse = 22 cm

Abstand Schwerpunkt zu Mittelpunkt des Trägerfahrzeuges = 5.5 cm

Höchstgeschwindigkeit = 40 km/h (mit veränderter Übersetzung)

Bezeichnung	Masse (kg)	Länge (cm)	Breite (cm)	Höhe (cm)
Gesamtfahrzeug	16.9	74	38.5	43

Tabelle 11: Gesamtfahrzeugdaten

Bezeichnung	Masse (kg)	Länge (cm)	Breite (cm)	Abstand Mittelpunkt - Schwerpunkt (cm)
GPS, Funk, Antenne (1)	1.05	10	15	10
Wlan (2)	1.3	17	25	21
CompactRio (3)	1.4	18	8	21
Trägerfahrzeug (4)	13.15	65	12	5.5

Tabelle 12: Komponentendaten

Die Position der einzelnen Komponenten (Nummer) am Modellauto ist im folgenden Bild zu erkennen.



Abbildung 56: Modellauto + Komponenten

Bestimmung der Trägheitsmomente des Modellautos im Schwerpunkt um die Hochachse:

Für die Berechnung des Trägheitsmomentes werden die einzelnen Komponenten als idealisierte Vollquader gesehen.

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (A^2 + B^2) + m \cdot r^2 \quad [3, 2001] \quad 9-1$$

A, B Abmessungen des Quaders

m Masse des Quaders

r Abstand des Schwerpunktes des Quaders zum Schwerpunkt des Gesamtfahrzeuges

Bezeichnung	Trägheitsmoment ($kg\ m^2$)
GPS Receiver + Funkmodem + GPS Antenne	0.108
Wlan	0.283
CompactRio	0.299
Trägerfahrzeug	1.545
Gesamtfahrzeug	2.235

Tabelle 13: Trägheitsmomente der Komponenten des Modellfahrzeugs

Bestimmung der Reifenseitensteifigkeit:

Da es sich beim Modellfahrzeug und auch bei den verwendeten Reifen lediglich um Modellbauteile handelt, besteht kein Interesse von Seiten der Hersteller (da keine Nachfrage), die Reifenparameter genau zu ermitteln, beziehungsweise diese Daten weiterzugeben. Weiters ist es, aufgrund der kleinen Dimension nicht möglich, die Reifen auf einem üblichen Reifenprüfstand zu testen, um dadurch die Werte zu erhalten. Deshalb wird die Reifenseitensteifigkeit auf anderem Wege ermittelt.

Allgemein ist zu erwarten, dass die Reifenseitensteifigkeit im selben Maßstab wie das Modellauto skaliert wird. Da die Reifensteifigkeit proportional der Querkraft ist, wird diese aufgrund des Zusammenhangs Kraft = Masse x Beschleunigung skaliert. Die Masse wird üblicherweise mit dem Maßstab zur dritten ($5^3 = 125$) skaliert, die Beschleunigung wird nicht

skaliert, da diese ja auch beim Modellauto unverändert ist. Somit ergibt sich ein Skalierungsfaktor von 125. Ausgehend von typischen Reifensteifigkeitswerten im Bereich von 60000 N/rad für aktuelle Reifen, würde dies einem Wert von zirka 480 N/rad für einen Modellautoreifen entsprechen. Um diese Annahmen zu stützen, soll die Reifensteifigkeit noch experimentell verifiziert werden [26, 1990]. Dazu wird das Modellfahrzeug bei konstantem Lenkwinkel eine Kreisfahrt durchführen und die Geschwindigkeit schrittweise erhöht, um so die Querkraft beziehungsweise die maximale Reifenseitensteifigkeit zu ermitteln.

Im ersten Schritt wird mit Hilfe einer Federwaage die Reibung der Fahrbahn ermittelt. Dazu werden die Reifen blockiert und die Kraft gemessen, die notwendig ist, um das Fahrzeug zu bewegen. Ausgehend vom Gewicht (16.9 kg) ergibt sich eine Normalkraft in z Richtung (F_z) von 166 Newton. Beim Zugversuch musste eine Kraft von 175 Newton (F_y) aufgewendet werden um das Fahrzeug zu bewegen. Dadurch ergibt sich ein Reibwert von $\mu \approx 1$ (Formel 9-2). Bei der Kreisfahrt (Lenkwinkel 10 Grad) konnte die Geschwindigkeit bis 15 km/h erhöht werden. Da das Modellauto über einen sehr hohen Schwerpunkt verfügt, neigt es bei dieser Konstellation bereits zum Kippen. Mittels DGPS konnte ein gefahrener Radius von 4 Metern gemessen werden.

$$\mu = \frac{F_z}{F_y} \approx 1 \quad 9-2$$

$$F_{y\max} = \mu \cdot m \cdot \frac{v^2}{r} = 1 \cdot 16.9 \cdot \frac{4.2^2}{4} = 75 \text{ N} \quad 9-3$$

$$c = \frac{F_{y\max}}{\alpha} = \frac{75}{0.174} = 428 \frac{\text{N}}{\text{rad}} \quad 9-4$$

Mittels Versuch konnte also eine Reifensteifigkeit (Formel 9-4) von zumindest 107 N/rad nachgewiesen werden. Somit kann die Reifensteifigkeit, basierend auf den Skalierungsgesetzen (480 N/rad), als durchaus realistisch angesehen werden und es wird diese für die weitere Modellbildung verwendet.

9.3 Einspurmodell

Eine erste Reglerauslegung kann anhand eines einfachen Modells bereits vorab erfolgen. Aufgrund der Verwendung eines Modellautos und relativ kleiner Geschwindigkeiten wird als Modell ein Einspurmodell herangezogen. Da die Aufstellung des Einspurmodells in

„Dynamik der Kraftfahrzeuge“ [25, 1990] ausführlich beschrieben ist, wird darauf lediglich kurz eingegangen. In Folge werden die geometrischen Zusammenhänge wie unten dargestellt verwendet.

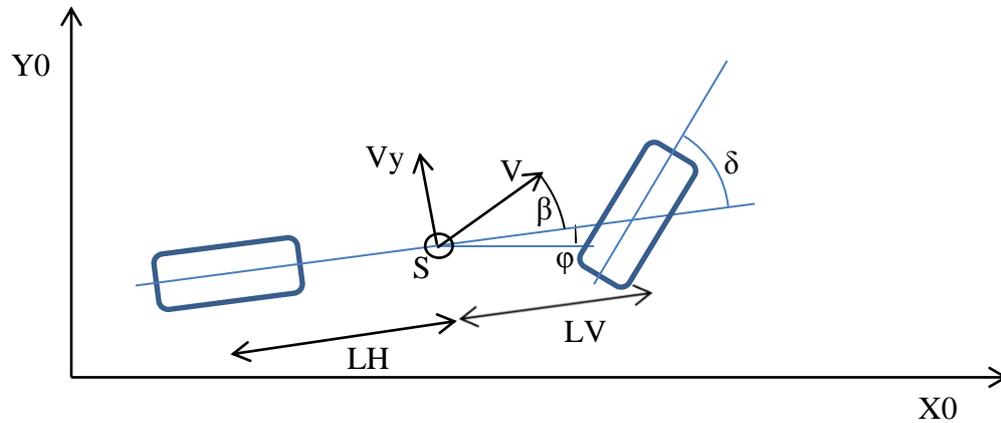


Abbildung 57: Skizze Einspurmodell

X_0, Y_0	Globales Koordinatensystem
V	Fahrzeuggeschwindigkeit
S	Schwerpunkt
L_H	Abstand Hinterachse – Fahrzeugschwerpunkt
L_V	Abstand Vorderachse – Fahrzeugschwerpunkt
V_y	Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung
β	Schwimmwinkel
φ	Winkel zwischen lokalem und globalem Koordinatensystem
δ	Lenkwinkel
m	Fahrzeugmasse
c_V	Reifenseitensteifigkeit vorne
c_H	Reifenseitensteifigkeit hinten

Unter Berücksichtigung konstanter Fahrgeschwindigkeit und Vernachlässigung von Seitenwindeinflüssen (da es sich um ein sehr kleines Objekt handelt) ergeben sich folgende Bewegungsgleichungen [28, 1990].

$$mv\dot{\beta} + (c_V + c_H) \cdot \beta + [mv^2 - (c_H l_H - c_V l_V)] \cdot \frac{\dot{\varphi}}{v} = c_V \cdot \delta \quad 9-5$$

$$J \cdot \ddot{\varphi} + (c_V l_V^2 + c_H l_H^2) \cdot \frac{\dot{\varphi}}{v} - (c_H l_H - c_V l_V) \cdot \beta = c_V l_V \cdot \delta \quad 9-6$$

Da das Modellfahrzeug nicht im dynamischen Grenzbereich getestet werden soll und den daraus resultierenden relativ kleinen Schwimmwinkeln, werden die Bewegungsgleichungen im Weiteren direkt über die Geschwindigkeiten in Y-Richtung ausgedrückt.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_V + c_H}{m v} & \frac{c_H l_H - c_V l_V}{m v} - v \\ \frac{c_H l_H - c_V l_V}{J v} & -\frac{c_V l_V^2 + c_H l_H^2}{J v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_V}{m} \\ \frac{c_V l_V}{J} \end{bmatrix} \delta \quad 9-7$$

Basierend auf diesem Modell kann nun vorab ein Regler entworfen werden, der im Anschluss in das Modellauto integriert und getestet wird.

9.4 Regelung

Für eine vollständige Simulation der automatisierten Testumgebung ist das Einspurmodell nicht ausreichend, da weitere Einflussfaktoren wie die Abtastrate und die Vorgabetrajektorie auch in der Simulation zu berücksichtigen sind. Bei realen Tests erfolgt die Vorgabe der Solltrajektorie über meterbasierte Positions- und Zeitdaten (siehe Kapitel 8.2: Einlesen und Verarbeiten des PC-Crash File). Durch die Integration der Logik werden auch in der Simulation, basierend auf den Stützstellen, Spline Funktionen erzeugt, wodurch eine Interpolation auch zwischen den Stützstellen möglich ist. Ausgehend vom Vorgabekurs können sowohl die Lenkwinkel, als auch die Geschwindigkeiten dem Modell vorgegeben werden. Aus dem Modell können wiederum die Querschleunigung und die Winkelgeschwindigkeit ausgelesen werden. Um eine Bewegung im globalen Koordinatensystem zu erhalten, ist eine Umrechnung der lokalen Parameter notwendig (s. Abbildung 58 und folgende Formeln).

Gegeben:

v_L Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs

v_{Ly} Geschwindigkeitsvektor in y-Richtung

Gesucht:

v_{Gx} Geschwindigkeitsvektor in globaler x-Richtung

v_{Gy} Geschwindigkeitsvektor in globaler y-Richtung

$$v_{Lx} = \sqrt{v_L^2 - v_{Ly}^2} \tag{9-8}$$

$$\begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Lx} \\ v_{Ly} \end{bmatrix} \tag{9-9}$$

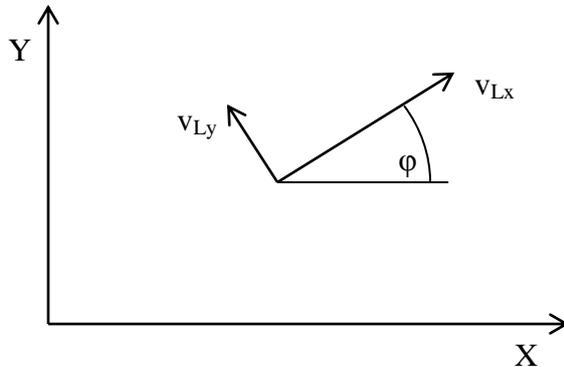


Abbildung 58: Zusammenhang globales und lokales Koordinatensystem

Daraus ergibt sich folgender Modellaufbau in Matlab/Simulink:

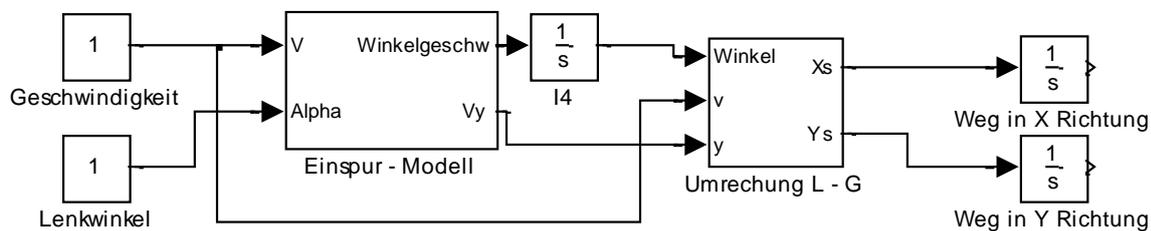


Abbildung 59: Fahrzeugmodell für die Auslegung der Reglerparameter

Um auch die Positionsungenauigkeit im Modell zu berücksichtigen, werden die berechneten X- und Y-Positionen mit einem weißen Rauschen überlagert. Durch diese Anpassungen ist es möglich, die Parameter des Querreglers, unter Berücksichtigung der Positionsungenauigkeiten in X- und Y-Richtung, theoretisch zu bestimmen.

9.4.1 Querregler

In Abbildung 60 ist ein typischer Verlauf einer Solltrajektorie (Stützpunkte) im globalen Koordinatensystem dargestellt. Die roten Kreuze markieren jene Positionen, die mittels DGPS ermittelt werden. Die schwarze Linie entspricht dem abzufahrenden Weg, welcher mittels Spline Funktionen ermittelt wurde. Die schwarzen Kreuze stellen einerseits den Punkt auf der

Spline Funktion dar, der den geringsten Abstand zur aktuellen Position besitzt, andererseits einen in fixem Abstand (Vorschauweite) befindlichen Punkt auf dem abzufahrenden Weg. Der minimale Abstand stellt hier den Ist – Fehler dar. Aus der aktuellen und den vergangenen Positionen und den zugehörigen Zeitpunkten lassen sich der Betrag und die Richtung des Geschwindigkeitsvektors ermitteln.

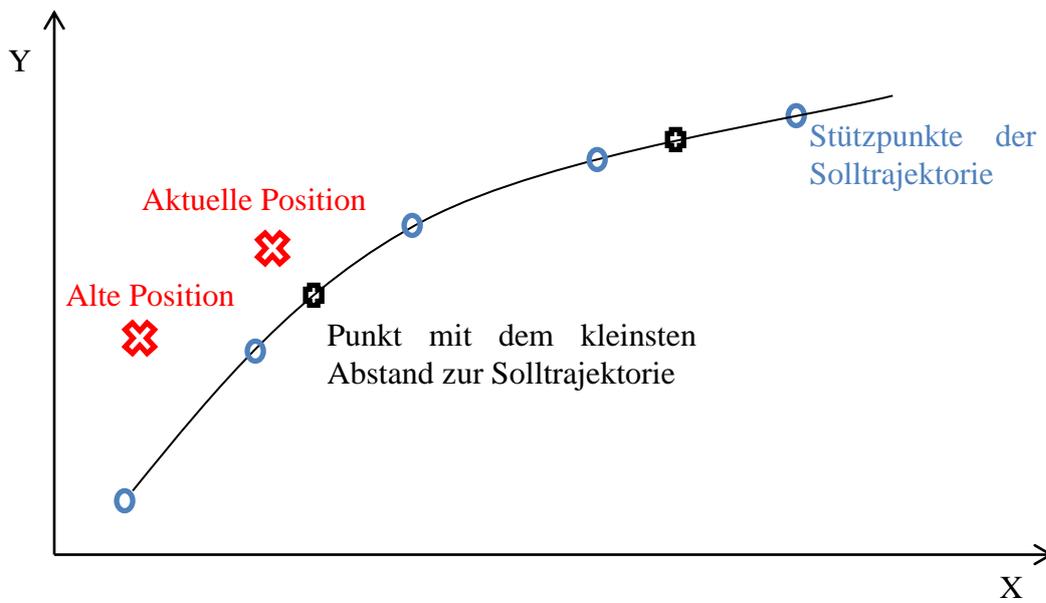


Abbildung 60: Ist – Position und Sollverlauf

Abstand- und Tangentenregler:

Im ersten Schritt wurde nur die Richtung des Geschwindigkeitsvektors mit der Richtung des Vorschaupunktes verglichen und mittels PI-Regler die Winkeldifferenz (s. Abbildung 61: Tangentenfehler) ausgeregelt. Wie zu erwarten war, ergibt sich dadurch eine Fahrtrajektorie, die „ident“ der Solltrajektorie ist, jedoch mit der Einschränkung einer nicht zuordenbaren, absoluten Position auf der Teststrecke. Mit einem solchen Regler sind also durchaus Fahrdynamiktests durchführbar.

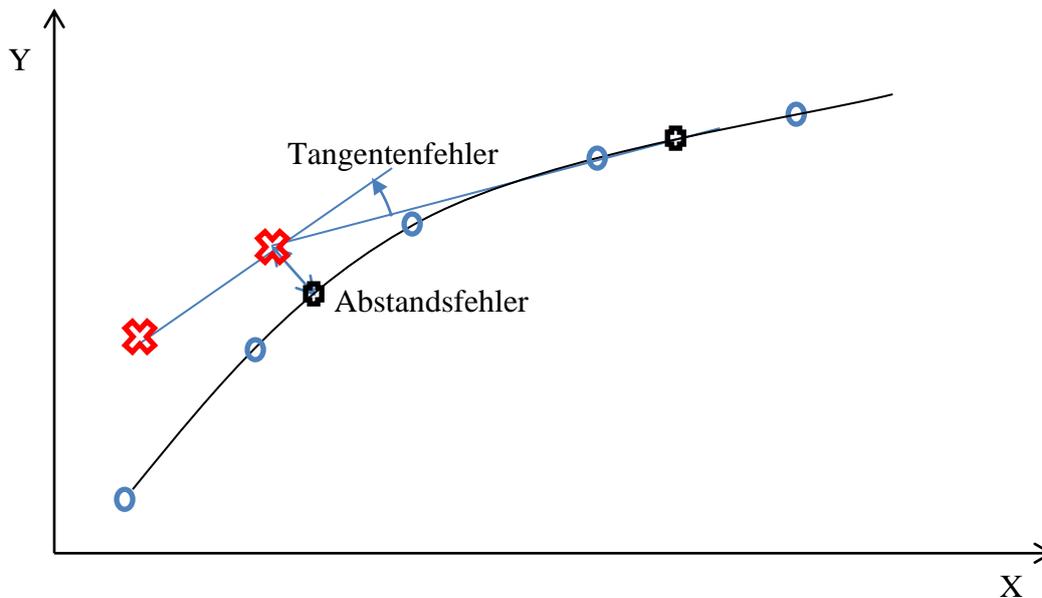


Abbildung 61: Abstand und Tangentenfehler

Da für die aktive Sicherheitsumgebung die Reproduzierbarkeit und somit auch die absolute Position entscheidend sind, wurde der Regler um eine Komponente (PI Regler) erweitert welche die Aufgabe hat, den Abstandsfehler (s. Abbildung 61) zu minimieren. Nun beeinflussen sich diese beiden PI-Regler natürlich gegenseitig. Durch geeignete Wahl der Vorschauweite und aller Reglerparameter bleiben auch bei dynamischen Manövern die Abweichungen reproduzierbar unter 10 Zentimeter (± 5 cm). Wird jedoch die konstant vorgegebene Geschwindigkeit erhöht (z.B. um 10 km/h), beeinflussen sich die beiden Regler, sodass sich das Fahrzeug selbst bei Geradeausfahrt aufschwingt. Durch erneute Variation der Reglerparameter kann das Modellauto auch an diese Geschwindigkeit angepasst werden. Da in der Endfassung der aktiven Sicherheitsumgebung Vorgaben zeitlich wie örtlich einzuhalten sind, muss auch die Geschwindigkeit entsprechend der Planung vorgegeben und eingehalten werden. Um dieses Reglerkonzept für die aktive Sicherheitsumgebung einsetzen zu können wäre es also notwendig, die Reglerparameter in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit anzupassen. Aus diesem Grund ist dieses Konzept nicht geeignet.

Abstandsregler und Lenkwinkelvorgabe:

Im zweiten Schritt wird der Lenkwinkel über geometrische Zusammenhänge näherungsweise ermittelt. Dazu wird ein Kreisradius (s. Abbildung 62, Radius - R) bestimmt, durch den der nächste Punkt erreicht werden kann. Betrachtet man diesen Zusammenhang für große Lenkwinkel (s. Abbildung 62, $\alpha = 80^\circ$), würde sich bei Erreichen des Vorschaupunktes ohne

weitere Korrekturingriffe eine Abweichung von bis zu 20 Zentimetern ergeben (Abstand grüne Linie - Vorschauunkt).

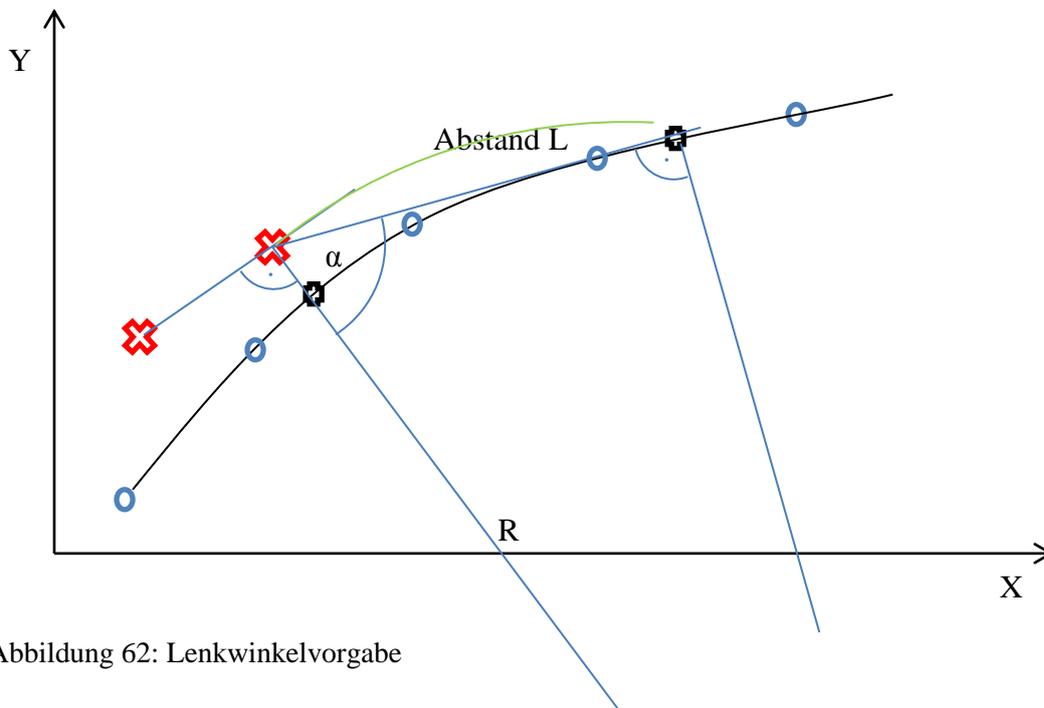


Abbildung 62: Lenkwinkelvorgabe

Da der Lenkwinkel aber in 0.05 Sekundenschritten neu berechnet und aufgrund des kleiner werdenden Lenkfehlers der ermittelte Kreisradius größer wird, wird der Abstandsfehler mit kleiner werdendem Lenkwinkel geringer. Der Lenkwinkel kann, ausgehend vom so bestimmten Kreisradius und der Fahrzeuggeometrie (s. Abbildung 63, Radabstand) laut ACKERMANN [27, 1990] berechnet werden.

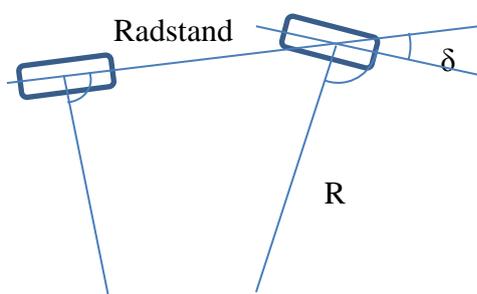


Abbildung 63: Zusammenhang Kreisradius – Lenkwinkel

Als Erweiterung wird ein Integrierer eingebaut, der den Abstandsfehler noch minimiert (s. Diagramm 8, Querabstand) und auch verschiedenste andere Störeinflüsse berücksichtigt.

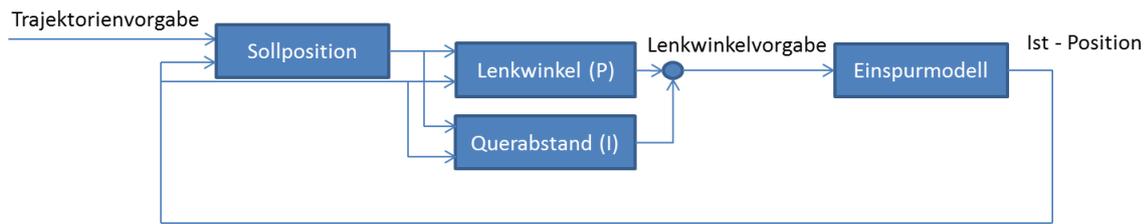


Diagramm 8: Ablaufdiagramm Querregler

Für die Überprüfung der Funktionsfähigkeit, sowohl des Modells in der Simulation, als auch des realen Modellfahrzeuges, wurden zwei Szenarien gewählt. Das erste ist lediglich eine Geradeausfahrt, während das zweite ein so genannter S-Turn (s. Abbildung 66) ist. Prinzipiell kann bei der Geradeausfahrt die Stabilität der Regler in Abhängigkeit von verschiedenen Geschwindigkeiten getestet werden. Des Weiteren können damit auch recht einfach Störeinflüsse betrachtet werden. So wurden dazu Tests im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 30 km/h in der Simulation und im Bereich zwischen 7 km/h und 25 km/h im Realversuch durchgeführt. Auch wurden sowohl bei der Simulation, als auch beim Modellfahrzeug Lenkwinkelsprünge vorgegeben um das weitere Verhalten zu überprüfen.

In Abbildung 64 ist beispielhaft die Querabweichung (ungefiltert) für die Simulation der Geradeausfahrt bei 15 km/h dargestellt. Aufgrund des überlagerten weißen Rauschens im Bereich von ± 2 cm kann gesagt werden, dass die Geradeausfahrt in der Simulation sehr gut funktioniert.

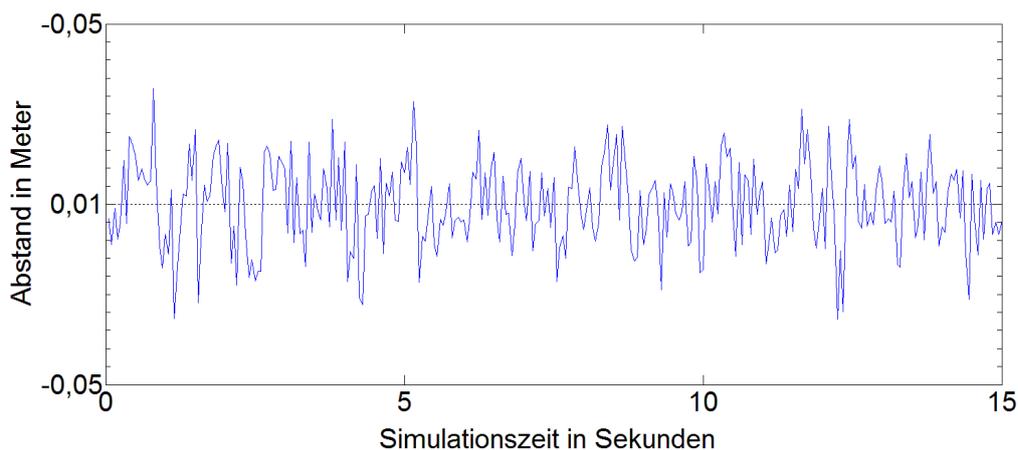


Abbildung 64: Auftretende Querabweichung der Simulation Geradeausfahrt (15 km/h)

Der selbe Versuch wurde mit dem realen Modellauto (s. Abbildung 65), vier Mal auf einer Teststrecke durchgeführt. Auch hier ergaben sich Fehler von unter 5 Zentimetern. Der

Einschwingvorgang zu Beginn ist dadurch zu erklären, dass das Modellauto nicht auf der Vorgabetrajektorie positioniert, beziehungsweise nicht in dieselbe Richtung ausgerichtet war. Da die Fahrzeuge bei Realtests ebenso nicht exakt positioniert werden (zeitaufwändig) ist auch der Einschwingvorgang von Interesse.

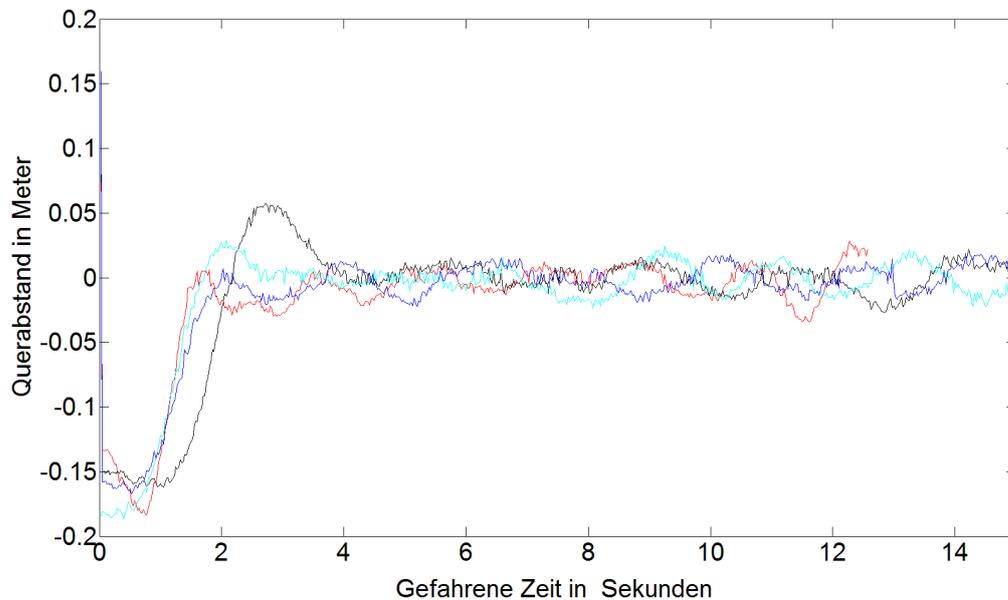


Abbildung 65: Auftretende Querabweichungen bei der Geradeausfahrt mit dem Modellauto (4 Testfahrten mit 15 km/h)

Als zweiter Versuch wurde dem Modellauto ein S-Turn (s. Abbildung 66) als Vorgabetrajektorie vorgegeben. Hinsichtlich der Regelung bedeutet dies zu Beginn einen Einschwingvorgang aufgrund der Positionierung und daran zeitlich anschließend weitere Abweichungen zwischen Soll- und Istkurs aufgrund der notwendigen Lenkbewegung. Auch dieses Manöver wurde sowohl in der Simulation, als auch beim Realversuch mit 15 km/h gefahren.

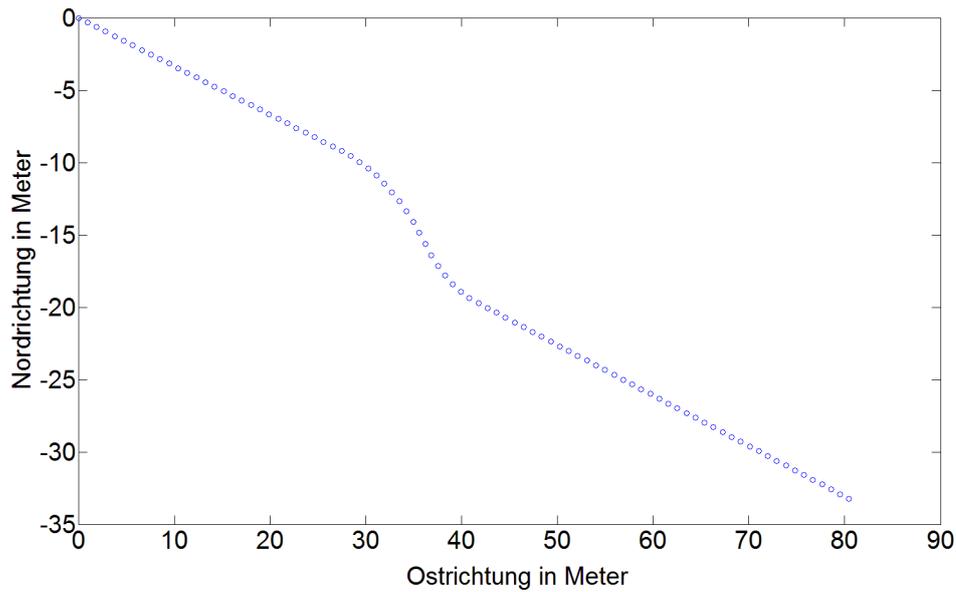


Abbildung 66: S-Turn (Nord – Ost Ausrichtung)

In Abbildung 67 ist zuerst wieder die Simulation dargestellt. Man erkennt auch hier zu Beginn einen Einschwingvorgang. Die Simulation startet mit dem Geschwindigkeitsvektor in X-Richtung. Da die Vorgabetrajektorie jedoch nach rechts unten führt, muss das Modell diesen ersten Lenkvorgang ausführen. Auch bei dieser Simulation sind die Querabweichungen entlang des Kurses kaum größer als 5 Zentimeter.

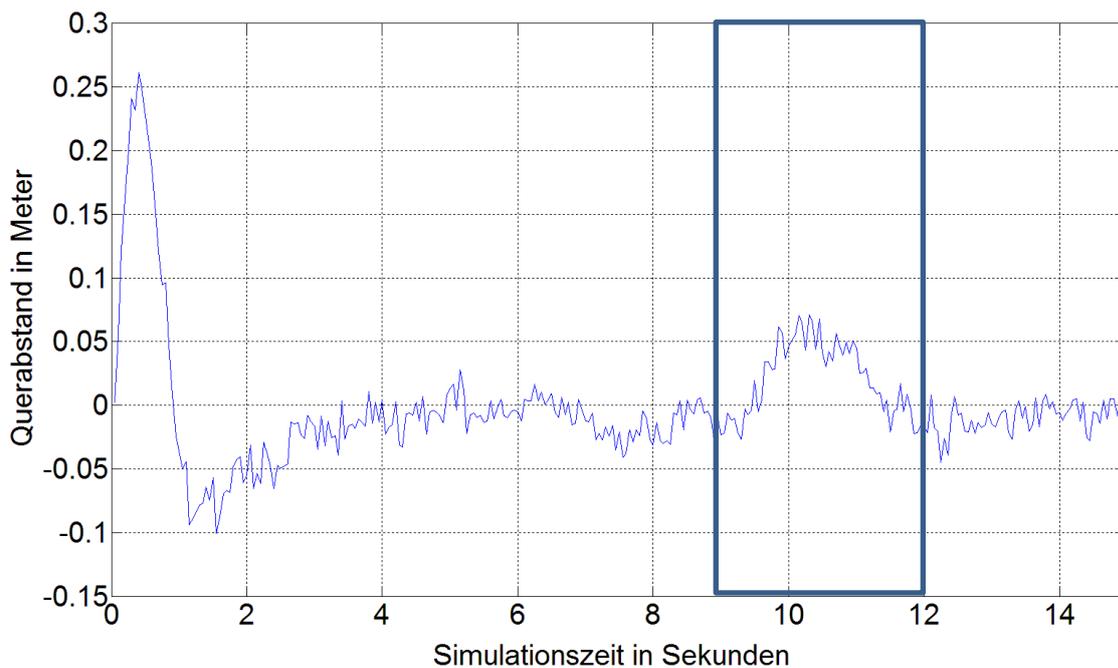


Abbildung 67: Auftretende Querabweichung bei der Simulation des S-Turn (15 km/h)

In Abbildung 68 sind zum Vergleich die Ergebnisse des Realversuches abgebildet. Auch hier zu Beginn wieder der Einschwingvorgang. Im Bereich des Rechtecks 9 – 12 Sekunden (Simulation, als auch Realversuch) wird das Lenkmanöver ausgeführt, daraus resultiert die Abweichung von bis zu 10 Zentimetern. Hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Tests zeigt sich, aufgrund des nahezu identischen Verlaufs, eine sehr gute Anwendbarkeit für automatisierte Tests. Auch treten erhöhte Abweichungen zwischen Soll- und Istkurs nur in dynamischen Bereichen auf und kehren nach Beendigung des Manövers wieder in einen Bereich mit sehr geringen Abweichungen zurück.

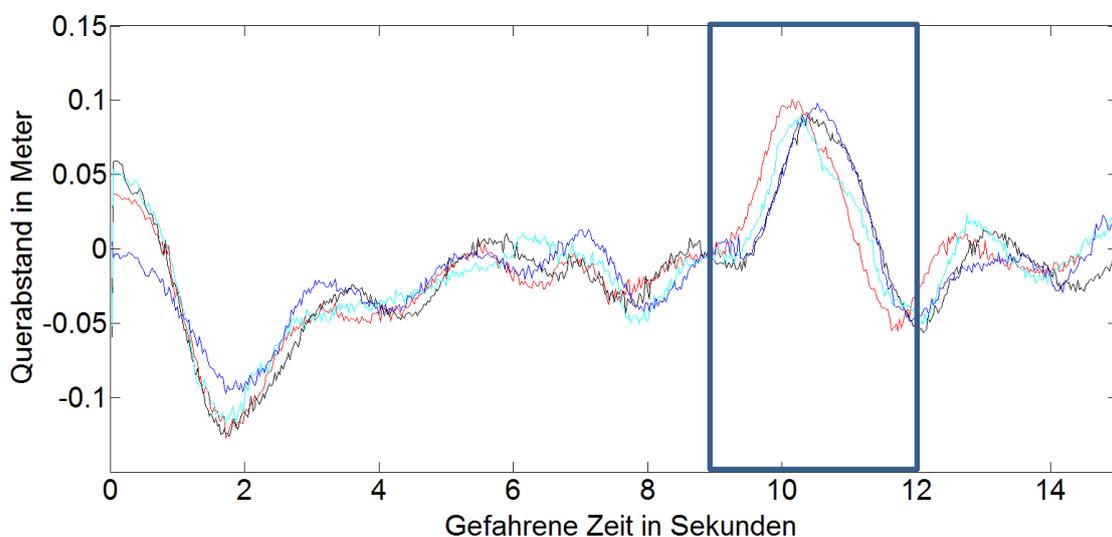


Abbildung 68: Auftretende Querabweichungen beim Manöver S-Turn mit dem Modellauto (4 Testfahrten mit 15 km/h)

Durch die Simulationen und Realversuche konnte die Funktionalität der Querregler gezeigt werden. Zu bemerken ist hier noch, dass die Querregelung einem weiteren Faktor unterliegt. Durch die Verwendung eines elektrischen Lenkservos ist dieser natürlich von einer Spannungsversorgung abhängig. Verfügen die Akkus nur mehr über wenig Energie, reduziert sich das zur Verfügung stehende Moment des Lenkservos und somit die Agilität der Regelung.

9.4.2 Längsregler

Als Abschluss wird in die aktive Sicherheitsumgebung noch die Längsregelung integriert. Aus der räumlichen und zeitlichen Distanz zwischen dem Vorschau – Punkt und dem Ist – Punkt ergibt sich die Sollgeschwindigkeit. Diese Berechnung allein würde für eine Geschwindigkeitsregelung (Tempomat) bereits ausreichen. Da in der aktiven Sicherheitsumgebung jedoch nicht die Geschwindigkeit, sondern die räumliche und zeitliche Zuordnung von Interesse sind, wird der Regler zusätzlich noch über die Zeitdifferenz zwischen aktuellem Soll- und Ist- Punkt beeinflusst.

Diese Regler wurden auf der Teststrecke auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Dazu wird in der ersten Versuchsreihe dem Modellfahrzeug eine Gerade vorgegeben, die mit konstant 10 km/h abgefahren werden soll. In der Solltrajektorie ist kein Beschleunigungsvorgang enthalten. Es kommt also gleich zu Beginn zu einem maximalen Fehler, der ausgeregelt werden muss. Der Verzicht auf den Beschleunigungsvorgang ist wie folgt zu begründen: Aufgrund des hohen zusätzlichen Gewichtes das am Modellfahrzeug montiert wurde, ist eine Gasstellung von mindestens 30 % notwendig um das Fahrzeug langsam in Bewegung zu versetzen. Wie in Kapitel 8.9.2 zu sehen ist, entspricht diese Gasstellung aber bereits einer Geschwindigkeit von ca. 13 km/h. Um also Geschwindigkeiten unter 10 km/h fahren zu können ist es notwendig, das Modellfahrzeug zuerst zu beschleunigen, um anschließend eine langsamere Geschwindigkeit erreichen zu können. Des Weiteren ist es vollkommen ausreichend, wenn das Modellfahrzeug erst nach einer bestimmten Zeit alle Toleranzen einhält, da dieser Zeitraum in der Planung einfach berücksichtigt werden kann.

In Abbildung 69 ist der auftretende Längsfehler zwischen Soll – und Ist – Position dargestellt. Der steile Anstieg zu Beginn stellt das Wegfahren des Modellautos dar. Ab 10 Sekunden Fahrtzeit bleibt die Abweichung unter 0.2 Sekunden. Ab diesem Zeitpunkt ist der Verlauf der unterschiedlichen Testfahrten nahezu identisch und somit reproduzierbar. Leider spielt die Leistung der Akkus für die Antriebseinheit eine wesentlich größere Rolle als dies bei der Querregelung der Fall ist. Die Tests bei verschiedenen Leistungsstufen sind in Abbildung 69 deutlich durch die verschobenen ansteigenden Flanken zu erkennen. So verfügten die Akkus im ersten Test ganz links, über die meiste Energie. Dies spielt insofern eine Rolle, da es bei sehr niedriger Energie zu einem nichtmehr Anfahren des Modellautos führen kann beziehungsweise bei etwas mehr Energie die Beschleunigungsvorgänge mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten beginnen.

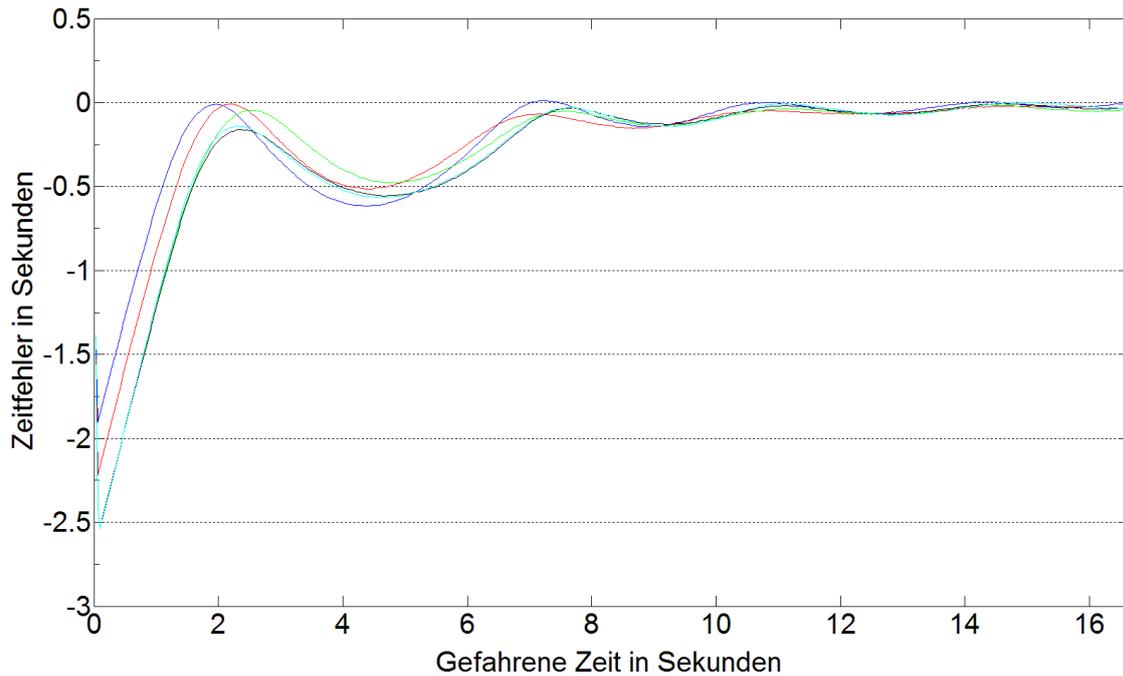


Abbildung 69: Längsfehler entlang einer Geraden (5 Testfahrten mit 15 km/h)

In Abbildung 70 ist der auftretende Längsfehler entlang des – auch mit dem Querregler gefahrenen – S-Turns dargestellt. Vor den Versuchen wurden die Antriebsakkus getauscht, deshalb sind die Anstiege und der gesamte Verlauf nahezu ident. Sehr gut zu erkennen ist, dass das mit konstanter Geschwindigkeit gefahrene Manöver (S-Turn im Bereich von 9 bis 12 Sekunden) keinen Einfluss auf den Zeitfehler hat.

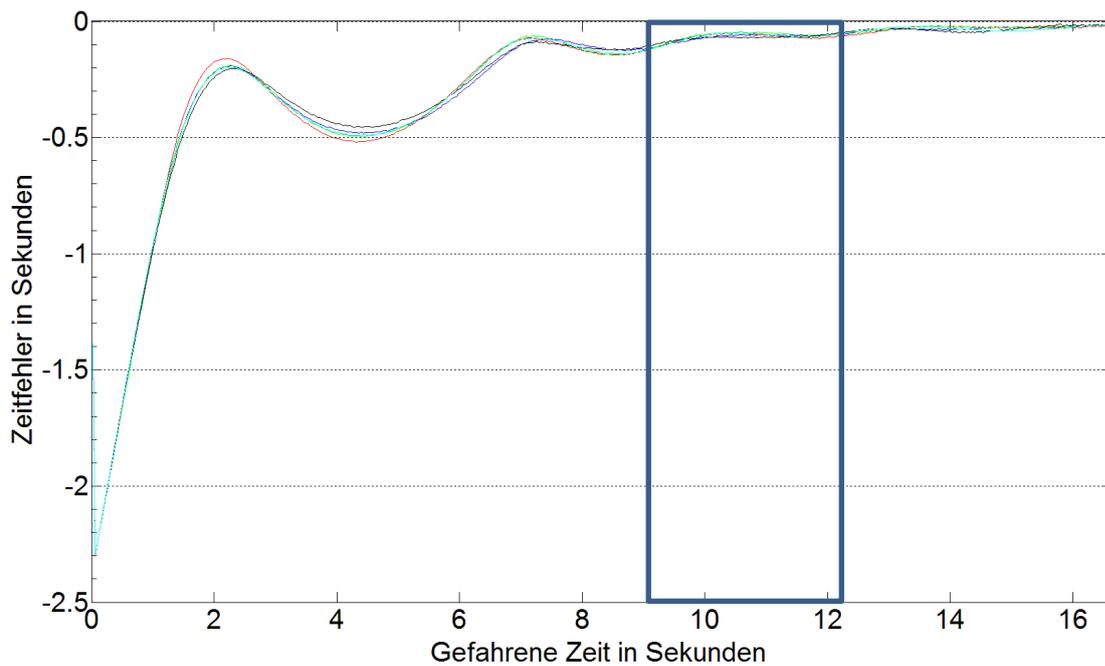


Abbildung 70: Längsfehler entlang eines S-Turns (5 Testfahrten mit 15 km/h)

Die getesteten Regler können also sowohl zeitlich wie räumlich reproduzierbar, Trajektorien mit geringer Dynamik abfahren. Dabei sind bei der Querregelung ohne weiteres auch absolute Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreichbar. Durch die Trägheit und geringe Antriebsleistung sind mit dieser Längsregelung zwar reproduzierbare Tests (hinsichtlich der reproduzierbaren Genauigkeit) durchführbar, die gewünschte absolute Genauigkeit in Längsrichtung kann mit diesem Regler jedoch erst nach einer langen Einschwingzeit (~20 Sekunden) erreicht werden. Selbstverständlich könnte diese Zeitspanne durch andere Regler deutlich reduziert werden, da es hierbei jedoch lediglich um den Nachweise der Reproduzierbarkeit der aktiven, skalierten Testumgebung geht, können diese Regler in Folgeprojekten ausgearbeitet und überprüft werden.

10 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeiten an dieser Dissertation (2007) beschränkten sich Gesamtfahrzeugtestumgebungen für aktive Sicherheitssysteme meist auf die Realisierung eines speziellen Szenarios. So wurden Szenarien mit Querverkehr beispielsweise mittels Seilzuganlagen und Szenarien im Begegnungs- beziehungsweise Folgeverkehr mittels Ausleger realisiert. Diese Methoden bergen natürlich Einschränkungen, auch wurden mit der Zeit immer hochauflösendere Sensoren für aktive Sicherheitssysteme entwickelt, die es zu testen gilt. So entstand die Notwendigkeit einer Testanlage, die bei der Entwicklung zukünftiger Sicherheitssysteme hilfreich ist. Dabei steht vor allem die Reproduzierbarkeit der Tests im Zentimeterbereich im Vordergrund. Solche Genauigkeiten sind aber von Testfahrern kaum zu realisieren und betrachtet man dabei noch Szenarien, in denen zwei Fahrzeug mit hohen Geschwindigkeiten knapp aneinander vorbei fahren, so ist auch die Sicherheit der Testfahrer nicht zu gewährleisten. Deshalb entstand die Idee, Fahrzeuge mittels Robotern koordiniert automatisiert zu bewegen. Dies bedeutet, dass sich Fahrzeuge auf vorgegebenen Trajektorien präzise räumlich wie zeitlich bewegen und somit sind auch verschiedenste „gefährliche“ Manöver durchführbar. Im ersten Schritt wurde ein umfassendes Sicherheitskonzept für den Betrieb automatisiert fahrender Fahrzeuge auf Teststrecken entwickelt. Da bei bisherigen Tests der Testfahrer die Verantwortung getragen hat und sich nun keinerlei Person im Fahrzeug befindet, ist es nun notwendig, dem Fahrzeug Sicherheitskompetenz zu übergeben. Dazu ist es erforderlich, dem Fahrzeugrechner sowohl die Ist – als auch die Soll – Position und die zulässigen Abweichungen vorzugeben, damit dieser im Fehlerfall selbständig reagieren kann. Da sich durchaus mehrere automatisierte Fahrzeuge auf der Teststrecke befinden können, müssen die Fahrzeugzustände von außen, sowohl von einem Computer, als auch von einem Menschen überwacht werden. Einen weiteren Unterschied stellt der Fehlerfall dar. Tritt bei einem Testfahrer ein schwerer Fehler auf, wird dieser alles versuchen das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen. Beim Fehlerfall am Fahrzeugrechner muss davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug im „worst case“ auch noch beschleunigt. Es muss also unter allen Umständen mittels physikalischer Barrieren dafür gesorgt werden, dass ein automatisiertes Fahrzeug die Teststrecke nicht verlassen kann. Um nun eine klare Aussage treffen zu können, ob die Fahrzeuge fehlerfrei funktionieren oder ob schon ein Fehlerfall vorliegt, wurden Betriebszustände und auch die Einflussfaktoren für einen Wechsel zwischen den Betriebszuständen definiert. Da vor allem der Betriebszustand Testabbruch von Interesse ist, wurde hier anhand verschiedenster Szenarien aufgezeigt wie ein solcher Testabbruch zu planen ist und auch durchgeführt werden muss. Für eine bessere

Abschätzung der Wirksamkeit der Testabbruchmanöver wurden auch diese hinsichtlich ihrer Effizienz für die Vermeidung von Kollisionen untersucht. Da die Planung der Testabbruchmaßnahmen vor allem bei komplexen Szenarien mit mehreren Fahrzeugen und die damit verbundenen Auswirkungen und jeweiligen Positionen der Fahrzeuge zum jeweiligen Zeitschritt ohne unterstützende Software kaum überschaubar sind, wurde im Zuge der Dissertation eine Planungssoftware („Testcenter“), basierend auf dem Programm PC-Crash, für die Planung von Testszenarien und vor allem auch sicherer Testabbrüche, entwickelt. Das Programm Testcenter unterstützt dabei den Planer beim Auffinden von kritischen Bereichen (in denen es zu Kollisionen kommen kann) und überprüft entlang des gesamten Kurses, ob es, sowohl bei den gewählten Abbruchmaßnahmen, als auch beim geplanten Kurs zu Kollisionen oder einem Verlassen der Teststrecke kommt. Zeigt die Software bei der Simulation bereits eine Kollisionswahrscheinlichkeit an, so muss auch beim Realtest mit einer Kollision gerechnet und daher das Szenario selbst oder die Testabbruchmaßnahmen verändert werden. Neben den Sicherheitsüberlegungen und einer Software für die einfache Planung der Szenarien ist selbstverständlich oder gerade auch die verwendete Hardware für eine aktive Sicherheitsumgebung von entscheidender Bedeutung. Da aufgrund der hohen Kosten eine Realisierung der aktiven Sicherheitsumgebung mit realen Fahrzeugen nicht möglich war, wurden diese mit Modellautos im Kleinen realisiert. Die Hardwarekomponenten wurden dennoch so ausgewählt, dass ein Einsatz auch in Realfahrzeugen mit wenigen Modifikationen möglich ist. So wurde sowohl bei der Kommunikation, als auch beim Steuerrechner darauf geachtet, leistungsfähige Komponenten auszuwählen. Für die Positionsbestimmung wurde ein DGPS gewählt, welches hinsichtlich der Abstraten, durch eine Erweiterung mit einer Inertialplattform, auch für den Einsatz im Realfahrzeug geeignet ist. Weitere wichtige Aspekte waren kleine und leichte Bauteile, benötigte Spannungen von maximal 12 Volt und eine einfache Erweiterbarkeit, da diese Modellumgebung für weitere Projekte Verwendung finden soll. Durch die Wahl des Steuergerätes (CompactRio), ergab sich auch die Programmiersprache (LabView) für die Steuerung des Modellautos. Mit dem CompactRio wurde die Kommunikation mit der Positionsbestimmungshardware, dem Lenkservo, dem Motorcontroller und dem Überwachungscomputer hergestellt. Weiters wurden Softwaremodule realisiert, mit welchen Vorgabetrajektorien aus einem Textfile eingelesen und wichtige Daten in einem anderen Textfile gespeichert werden können. Mittels der Software ist es nun möglich, die Steuerung des Modellautos über den Überwachungscomputer durchzuführen. Im letzten Schritt werden eine Längs- und eine Querregelung im Steuerrechner integriert, um zu zeigen, dass

reproduzierbare Test mit einer aktiven Sicherheitsumgebung möglich sind. Die Querregelung (Vorgabe des Lenkwinkels und Korrektur über die Querabweichung) wurde mit Hilfe eines Einspurmodells ausgelegt und führt Tests mit Abweichungen von maximal 10 Zentimetern reproduzierbar aus. Zwar können die absoluten Abweichungen gerade in dynamischen Bereichen auch größer werden, diese verhalten sich aber bei jedem Test nahezu ident und sind somit sehr gut für eine aktive Sicherheitsumgebung geeignet. Die Längsregelung wurde über eine Geschwindigkeitsvorgabe und einer Korrektur über den Zeitfehler realisiert. Nach einem Einschwingvorgang hält das Modellfahrzeug nahezu unabhängig vom Fahrmanöver (solange nicht hochdynamisch) seine Geschwindigkeit. Somit konnte der Nachweis erbracht werden, dass reproduzierbares, automatisiertes Fahren im Kleinen möglich ist.

11 Aktueller Stand und weiterer Ausblick

Aktueller Stand:

Die DAIMLER AG verfügt seit 2010 über die weltweit erste Teststrecke [9] mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen:



Abbildung 71: DAIMLER Teststrecke [9]

Mit dieser Teststrecke lassen sich alle modernen Assistenzsysteme hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit überprüfen. Die reproduzierbaren Genauigkeiten liegen dabei im Zentimeterbereich [19, 2009]. Die Hardware für das Automatisieren der Fahrzeuge wurde von der Firma ABD [47, 2008] entwickelt. Die in dieser Arbeit entwickelten Sicherheitsroutinen sind weitgehend, sowohl bei der Planung der Teststrecke, als auch bei der Umsetzung der Sicherheitsstrategien in den Fahrzeugen, mit eingeflossen. Auch wird die entwickelte Software für die Überprüfung geplanter kritischer Testszenarien eingesetzt. Eine erste Erweiterung dieser Testanlage stellt das sogenannte Softcrashtarget [1] dar. Damit sind auch Kollisionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ohne Beschädigungen durchführbar. Um auch Kollisionen mit höheren Geschwindigkeiten durchführen zu können, wird die Testumgebung mit dem UFO [38] der Firma DSD erweitert. Auf dieser überfahrbaren Plattform können beliebige Softcrashhindernisse transportiert werden. Somit können mit der

gesamten Testanlage nicht nur Fahrzeug – Fahrzeug Situationen überprüft werden, es können auch Fußgänger – Szenarien nachgestellt werden.

Eine weitere moderne Testumgebung für aktive Sicherheitssysteme ist die Anlage von Autoliv [2].



Abbildung 72: Active Safety Testcenter Autoliv [2]

Bei dieser werden Softcrash Hindernisse automatisiert entlang eines Schienensystems verfahren. In Kombination mit diesen Hindernissen können Testfahrer sowohl die Funktionsfähigkeit von Pre-Crashsystemen, wie auch beispielsweise Nachtsichtkameras testen. Das Besondere an dieser Testumgebung sind die errichteten Häuserfronten die den Sensoren eine möglichst realistische Umgebung bieten. Durch eine Erweiterung mit automatisierten Fahrzeugen könnte diese Anlage hinsichtlich Reproduzierbarkeit noch verbessert werden und wäre somit gerade für Umgebungserkennungssensortests ideal.

Auch andere Firmen haben erkannt, welche Vorteile automatisiert fahrende Fahrzeuge bieten und beginnen ihre Teststrecken mit Systemen von beispielsweise ABD und VEHICO auszurüsten.

Weiterer Ausblick:

Für die Wirtschaft stellt eine automatisierte Testumgebung im Kleinen (skaliert) eine durchaus nützliche Zwischenstufe zwischen der Simulation und Realtests dar. Somit ist ohne große Teststrecke, aufwendiger Sicherheitseinrichtungen und großem finanziellen Aufwand sowohl das visualisieren von Test, als auch die Durchführung von Komponententests

möglich. Da es sich bei der skalierten, aktiven Sicherheitsumgebung jedoch auch um ein Hochschulprojekt handelt sollen selbstverständlich auch weitere Projekte mit eben diesem Grundgerüst realisiert werden. Ein Projekt, welches bereits zu Teilen fertig gestellt wurde, ist die Integration eines Laserscanners. Damit wurde ein aktives Sicherheitssystem realisiert, welches unter Voraussetzung einer möglichen Kollision aktiv ausweicht, um diese zu verhindern. Da dieser Bereich aber eine überaus umfangreiche Thematik darstellt, besteht hier immer Verbesserungspotential. Auch die verwendeten Regler sollen in weiteren Projekten durch „bessere“ Regler ersetzt werden. Ein weiteres Projekt für die nahe Zukunft ist die Integration einer C2X Kommunikation in der aktiven Sicherheitsumgebung, um auch diesen Forschungsbereich realistisch abdecken zu können.

12 Begriffe

ABS	Antiblockiersystem
C2C	Car to Car Kommunikation
C2X	Car to X (Infrastruktur, Fahrzeuge, etc.) Kommunikation
CB Funk	Citizens' band radio
c_H	Reifenseitensteifigkeit hinten
c_V	Reifenseitensteifigkeit vorne
dB _i	Antennengewinn in dB, i für isotrop
DGPS	Differential Global Positioning System
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm
FPGA	Field Programmable Gate Array
Fzg	Fahrzeug
g	Erdbeschleunigung
Galileo	Europäisches Satellitennavigationssystem
Glonass	Russisches Satellitennavigationssystem
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobil Communications
HIL	Hardware in the Loop
I/O	Input /Output
Kfz	Kraftfahrzeug
LH	Abstand Hinterachse - Fahrzeugschwerpunkt
Lidar	Light detection and ranging
LPM	Local Position Measurement
LPR	Local Positioning Radar
LV	Abstand Vorderachse - Fahrzeugschwerpunkt
m	Fahrzeugmasse

OEM	Original Equipment Manufacturer
RTK	Real Time Kinematic
TTL Logik	Transistor Transistor Logik
UFO	Ultra Flat Overrun able carrier
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
V	Fahrzeuggeschwindigkeit
VI	Virtual Instrument
V _y	Geschwindigkeit in Fahrzeugquerrichtung
WPA	Wi-Fi Protected Access
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wlan	Wireless Local Area Network
β	Schwimmwinkel
δ	Lenkwinkel
φ	Winkel zwischen lokalem und globalem Koordinatensystem

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufblasbares balloon car [43]	6
Abbildung 2: Ausleger mit Attrappe [8]	8
Abbildung 3: Seilzuganlage zur Bewegung von diversen Attrappen [21].....	9
Abbildung 4: Relativbewegung der Moving Base [37]	10
Abbildung 5: Testfahrzeug auf dem Rollenprüfstand der Testumgebung VeHIL [37]	11
Abbildung 6: EVITA TU-Darmstadt [17].....	12
Abbildung 7: Kreuzungsszenario	14
Abbildung 8: Positionstoleranzen in Abhängigkeit der Fahrzeugposition.....	20
Abbildung 9: Ebenendarstellung der Testumgebung in Bezug auf ein Sicherheitskonzept	25
Abbildung 10: Mögliche Betriebszustände der Testumgebung	27
Abbildung 11: Abbruchmaßnahmen – knappe Vorbeifahrt, Annäherung im toten Winkel	32
Abbildung 12: Abbruchmaßnahmen – knappe Vorbeifahrt an stehendem Hindernis	33
Abbildung 13: Abbruchmaßnahmen – Einscheren vor einem bewegten Fahrzeug	34
Abbildung 14: Abbruchmaßnahmen – Einscheren zwischen zwei bewegten Fahrzeugen	34
Abbildung 15: Abbruchmaßnahmen bei Kreuzungsszenario knappe Vorbeifahrt (1).....	36
Abbildung 16: Abbruchmaßnahmen bei Kreuzungsszenario knappe Vorbeifahrt (2).....	36
Abbildung 17: PC-Crash 3D und 2D Ansicht	41
Abbildung 18: Einstellmöglichkeiten der Fahrzeugparameter.....	43
Abbildung 19: Luftwiderstand	44
Abbildung 20: Sequenzfeld	45
Abbildung 21: Sequenz Beschleunigen.....	45
Abbildung 22: Planung mittels Spurpunkten	45
Abbildung 23: Prinzipdarstellung der Funktionsweise der entwickelten Planungssoftware ...	47
Abbildung 24: Import PMC Datei.....	49
Abbildung 25: PMC Dateien exportieren.....	49
Abbildung 26: Bericht erstellen	50
Abbildung 27: Minimal Abstände	51
Abbildung 28: Parameter Definitionsbereich.....	52
Abbildung 29: Abbruchmaßnahme „Hold Steering“ und „Move to offset“	53
Abbildung 30: Abbruchmaßnahmen Übersicht.....	54
Abbildung 31: Kollisionscheck	56
Abbildung 32: Überblicksdarstellung (Eingabefenster).....	58
Abbildung 33: Überblicksdarstellung (.dxf)	59

Abbildung 34: Realtest Linkskurve.....	61
Abbildung 35: Abbruch Linkskurve	62
Abbildung 36: Zentrale Überdeckung beim Kreuzungsszenario	65
Abbildung 37: Auslaufräume und Abbruchmaß-nahmen für ein Kreuzungsszenario	67
Abbildung 38: Darstellung aller Simulationen zur Abbruchmaßnahmenüberprüfung	67
Abbildung 39: Darstellung des maximalen Raumbedarfs und sicheren Bereiches	68
Abbildung 40: DGPS Funktion [34]	71
Abbildung 41: Inertialplattform [6].....	72
Abbildung 42: LPM System [10, 2006]	74
Abbildung 43: Stähle Lenkroboter [39]	81
Abbildung 44: Modellauto mit Aufbauten	83
Abbildung 45: GPS Receiver FlexPak, Funk-Datenübertragung, GPS Receiver DL-V3	84
Abbildung 46: CompactRio	85
Abbildung 47: Aufgebautes Modellauto	87
Abbildung 48: Schaltungsplan der aktiven Sicherheitsumgebung [35, 2011]	88
Abbildung 49: Spline Schema.....	92
Abbildung 50: Teil der Funktion zur Berechnung der Spline Faktoren.....	95
Abbildung 51: TTL Modul.....	97
Abbildung 52: Lenkservo.....	98
Abbildung 53: Lenkgestänge	98
Abbildung 54: Motorcontroller	99
Abbildung 55: Geschwindigkeitstest	101
Abbildung 56: Modellauto + Komponenten	106
Abbildung 57: Skizze Einspurmodell	109
Abbildung 58: Zusammenhang globales und lokales Koordinatensystem	111
Abbildung 59: Fahrzeugmodell für die Auslegung der Reglerparameter	111
Abbildung 60: Ist – Position und Sollverlauf.....	112
Abbildung 61: Abstand und Tangentenfehler	113
Abbildung 62: Lenkwinkelvorgabe.....	114
Abbildung 63: Zusammenhang Kreisradius – Lenkwinkel.....	114
Abbildung 64: Auftretende Querabweichung der Simulation Geradeausfahrt (15 km/h)	115
Abbildung 65: Auftretende Querabweichungen bei der Geradeausfahrt	116
Abbildung 66: S-Turn (Nord – Ost Ausrichtung)	117
Abbildung 67: Auftretende Querabweichung bei der Simulation des S-Turn (15 km/h)	117

Abbildung 68: Auftretende Querabweichungen beim Manöver S-Turn.....	118
Abbildung 69: Längsfehler entlang einer Geraden (5 Testfahrten mit 15 km/h).....	120
Abbildung 70: Längsfehler entlang eines S-Turns (5 Testfahrten mit 15 km/h)	121
Abbildung 71: DAIMLER Teststrecke [9].....	125
Abbildung 72: Active Safety Testcenter Autoliv [2]	126

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertung Softcrash	7
Tabelle 2: Bewertung Ausleger	8
Tabelle 3: Bewertung Traversenanlage	9
Tabelle 4: Bewertung VeHIL	11
Tabelle 5: Bewertung EVITA	12
Tabelle 6: Häufigkeit der einzelnen Unfalltypen, 2002 – 2007	63
Tabelle 7: Vergleich der Positionsmesssysteme	76
Tabelle 8: Bewertung der Funksysteme	80
Tabelle 9: Lenkeinschlag – Kreisdurchmesser des Modellfahrzeugs	100
Tabelle 10: Gasstellung – Geschwindigkeitstabelle des Modellfahrzeugs	101
Tabelle 11: Gesamtfahrzeugdaten	106
Tabelle 12: Komponentendaten	106
Tabelle 13: Trägheitsmomente der Komponenten des Modellfahrzeugs.....	107

15 Diagramme

Diagramm 1: Darstellung der Fahrzeugschwerpunktstände bei einem Kreuzungsszenario	66
Diagramm 2: Abstandsbestimmung anhand der Frequenz.....	73
Diagramm 3: LPM Positionsmessung eines stehenden Objektes	77
Diagramm 4: Software Ablaufdiagramm	89
Diagramm 5: Servostellsignal	97
Diagramm 6: Kreisfahrt	100
Diagramm 7: Gasstellung – Geschwindigkeit.....	102
Diagramm 8: Ablaufdiagramm Querregler	115

16 Quellenverzeichnis

1. ABD - Anthony Best Dynamics (2010): Softcrash Target; - Mai 2011 - http://www.abd.uk.com/en/Soft_Crash_Target
2. AUTOLIV (2009): Active Safety Testcenter; - April 2011 - http://www.testcenter.autoliv.com/wps/wcm/connect/autoliv/Home/Testing_SA_Eng/Active%20Safety
3. BEITZ W. und GROTE KH. (2001) Taschenbuch fuer den Maschinenbau. B33-B34. Berlin, Springer
4. BRUNNENGRÄBER D. (2011): Positionsbestimmung von Kranen und Transportfahrzeugen auf dem Terminal mit LPR und D-Gps;
5. CALIFORNIA PATH (2010): PATH; - Mai 2011 - <http://www.path.berkeley.edu/>
6. CAESAR DATENSYSTEME (2007): Inertialplattform / GPS; - August 2007 - <http://www.caesar-datensysteme.de/>
7. CONTINENTAL: ARS 300 Long Range Radar; - Jänner 2010 - http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/continental/industrial_sensors/themes/download/ars_300_datenblatt_091212_de.pdf
8. DAIMLER AG (2010): Daimler Ausleger; - Februar 2010 - [www.daimler.com](http://www.daimler.com;);
9. DAIMLER AG (2011): Automatisiertes Fahren; - Mai 2011 - <http://www.daimler-technicity.de/af/>
10. DOMAINKO P. (2006): LPM - Einzigartiges Positionsmesssystem für die Optimierung von Logistikprozessen und Warenverfolgung in Echtzeit; Tagungsunterlage 2. Österreichischer KMU Logistik-Tag; 6. März 2006; Wels; S. 84-99; 137 S.
11. EIGEL T. (2009): Integrierte Längs- und Querführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung; Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; Thesis/Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau
12. EUROPEAN SPACE AGENCY (2010): GALILEO; - Mai 2010 - http://www.esa.int/esaNA/SEMTK50DU8E_galileo_0.html
13. EUROPEAN COMMISSION (2001): White Paper - European transport policy for 2010: Time to decide; 142 S.
14. FEDERAL SPACE AGENCY (2011): GLONASS; -Dezember 2010 - <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:20:2455692688142361::NO>
15. FERGUSON J. (1964): Multivariable Curve Interpolation; Journal of the ACM, Volume: 11, Number 2, S. 221-228;

16. HACKENBERG U. (2008): Mensch und Maschine im Team - Die Zukunft der Fahrerassistenzsysteme; in: Volkswagen Aktiengesellschaft (Hrsg.): *p:news*; Ausgabe Juli-August 2008; 13 S.
17. HOFFMANN J. und WINNER H. (2008): EVITA - Das Untersuchungswerkezeug für Gefahrensituationen; 3. Tagung Aktive Sicherheit 7.4.2008; Garching bei München
18. HOSCHEK J. und LASSER D. (1992): Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung; S. 81-88; Stuttgart, B.G. Teubner Stuttgart
19. HURICH W., LUTHER J. und SCHÖNER HP. (2009): Koordiniertes Automatisiertes Fahren zum Entwickeln, Prüfen und Absichern von Assistenzsystemen; 10. Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel; 11.2.2009; Braunschweig
20. IBEO: Alasca XT; -Jänner 2010 -
http://www.ibeo-as.com/deutsch/products_alascaxtsingle_educational.asp
21. IDIADA (2010): Seilzuanlage; - März 2010 -
www.idiada.com
22. IMAR (2010): Inertialplattform; - April 2011 -
<http://www.imar-navigation.de/>
23. MARKGRAF C. (2002): Autonomes Fahren mit Hilfe der Magnetrangeltechnik; Univ. Hannover; Thesis/Dissertation; Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
24. MAYR R. (2001): Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung; Berlin Heidelberg New York, Springer
25. MITSCHKE M. (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C - Fahrverhalten, S.5-25; Berlin, Springer
26. MITSCHKE M. (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C Fahrverhalten, S.12-29; Berlin, Springer
27. MITSCHKE M. (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C Fahrverhalten, S.203-207; Berlin, Springer
28. MITSCHKE M. (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C Fahrverhalten, S. 24-25; Berlin, Springer
29. NATIONAL INSTRUMENTS (2011): Labview 8.5.1; -März 2011-
<http://www.ni.com/labview/d/>
30. MOTORAUTHORITY.COM (2009): Ford balloon car; -Februar 2009-
http://www.motorauthority.com/blog/1032087_ford-builds-10000-balloon-car-to-test-safety-systems
31. NOVATEL (2011): DGPS; -Mai 2011-
<http://www.novatel.com/products/products-overviewnovatel-gnss-products/>

32. OXFORD TECHNOLOGIES (2011): Inertialplattform; -März 2011-
<http://www.oxts.com/default.asp?pageRef=1>
33. PPM GmbH: DGPS - Systeme; -Mai 2011-
http://www.ppmgmbh.com/pages_de/produkte/produkte.html
34. AGNES: Automatisches GPS Netz Schweiz; -August 2007-
<http://www.fhbb.ch/02/03/5/vgi-publikationen/agnes.htm>
35. SCHMID R. (2011): Sensorintegration eines Laserscanners in ein automatisiert fahrendes Modellauto; Thesis/Dissertation; Institut für Fahrzeugsicherheit; TU Graz
36. SCHÖNER HP., NEADS S., SCHRETTNER N. (2009): Testing and Verification of active safety systems with coordinated automated driving; *ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference*; Juni 2009
37. SCHOUTEN N. (2008): Pre-crash Testmöglichkeiten in der VeHIL Anlage; Automotive testingexpo 2008 Europe; 5.6.2008; Stuttgart
38. SCHÜSSLER A. (2010): UFO - Evaluierung von aktiven Sicherheitssystemen; 5. Praxiskonferenz Fußgängerschutz 30.6.2010; Bergisch Gladbach
39. STAHL: Lenkroboter; -Dezember 2010-
<http://www.stahle.com/de/produkte.php?gr=3&prod=18>
40. STEFFAN H. and MOSER A. (1996): The Collision and Trajectory Models of Pc-Crash; International Congress & Exposition; Detroit; Paper No: 960886
41. STEFFAN H. and MOSER A. (2001): The Application of PC-Crash on Accident Reconstitution and Road Safety; International traffic safety conference; Dubai
42. TAGHEUER - PROFESSIONAL TIMING: Laserlichtschranke; -März 2011-
<http://www.tagheuer-timing.com/products/photocells/hl2-31/index.lbl?lang=de>
43. THATCHAM (2010): balooncar; -März 2010-
www.thatcham.org
44. TOMASCH E. und STEFFAN H. (2006): ZEDATU – Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich – A Central Database of Fatalities in Austria; ESAR - Expert Symposium on Accident Research; Hannover
45. LOS ANGELES AIR FORCE BASE (2010): Global Positioning System; -Dezember 2010-
<http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5311>
46. VEHI.CO (2011): Fahrzeugroboter; -Mai 2011-
<http://www.vehico.de/de/produkte>
47. WATTS B. und PICK A. (2008): Robotic Precision; Zeitschrift ATZ autotechnology; März 2008 Volume: 8