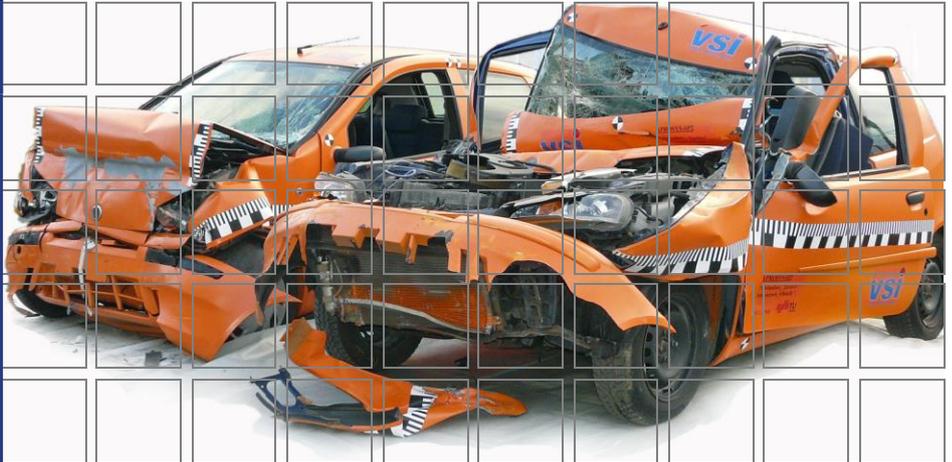


Matthias Lang, BSc.



© TU Graz

Entwicklung eines Fahrermodells für  
kombinierte Lenk- und Bremsmanöver in  
Unfallsituationen

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades einer/s

Diplom-Ingenieurin/Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung: Maschinenbau

Technische Universität Graz

Betreuer: Dipl.-Ing. Edwin Christoph Klein

Dipl.-Ing. Harald Kolk, BSc.

Beurteiler: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan

Graz, Jänner 2016



Eidesstattliche Erklärung

## 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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)



## VORWORT/DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan, der durch die von ihm abgehaltenen Lehrveranstaltungen mein Interesse rund um das Thema der Fahrzeugsicherheit geweckt hat.

Im Speziellen möchte ich Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Sinz für die Ermöglichung dieser Arbeit danken.

Ein großer Dank gilt meinen Betreuern Dipl.-Ing. Edwin Christoph Klein und Dipl.-Ing. Harald Kolk, die mir jeder Zeit mit ihrem Wissen, Anregungen und Denkanstößen zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben.

Weiters möchte ich mich bei meiner Freundin Martina bedanken, die mir auch in schwierigeren Phasen aufmunternd zur Seite stand und so für die nötige Motivation zum Gelingen dieser Arbeit sorgte.

Abschließend gilt mein Dank meinen Freunden und Studienkollegen, die mich bereits während des Studiums durch ihr Interesse und ihre Einstellung stets motivierten und somit im weiteren Sinne ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. KURZFASSUNG/ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>2. EINLEITUNG.....</b>	<b>3</b>
<hr/>	
<b>2.1 Motivation.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Ziele .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Literaturstudie.....</b>	<b>4</b>
2.3.1 Grundlage der Fahrermodelle .....	4
2.3.2 Unterschiedliche Fahrermodelle und deren Einteilung .....	7
2.3.5.1 <i>Einteilung von Fahrermodellen.....</i>	<i>7</i>
2.3.5.2 <i>Beispiele für Fahrermodelle aus der Literatur.....</i>	<i>13</i>
2.3.3 Das Ausweichmanöver .....	18
2.3.4 Das Bremsmanöver.....	24
2.3.5 Fahrerverhalten in kritischen Situationen – Entscheidungsverhalten des Fahrers.....	28
2.3.5.1 <i>Ideale Manöverauswahl zur Unfallvermeidung .....</i>	<i>28</i>
2.3.5.2 <i>Studien zur tatsächlichen Entscheidungswahl des Fahrers .....</i>	<i>29</i>
<b>3. METHODE.....</b>	<b>34</b>
<hr/>	
<b>3.1 Das Fahrermodell allgemein.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Das Ausweichmodell.....</b>	<b>37</b>
3.2.1 Die Ausweichtrajektorie .....	38
3.2.2 Das Lenkmodell .....	38
3.2.3 Integration des Lenkmodells im Ausweichmodell.....	42
<b>3.3 Das Bremsmodell.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Das Kombinationsmodell .....</b>	<b>46</b>
<b>3.5 Der Entscheider .....</b>	<b>47</b>
<b>3.6 Die Parameter des Fahrermodells.....</b>	<b>49</b>
3.6.1 Parameteranpassung .....	51
<b>4. IMPLEMENTIERUNG.....</b>	<b>58</b>
<hr/>	

<b>4.1</b>	<b>Implementierung des Fahrermodells .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Implementierung des Entscheiders.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Implementierung des Ausweichmodells.....</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>Implementierung des Bremsmodells.....</b>	<b>63</b>
<b>4.5</b>	<b>Implementierung des Kombinationsmodells.....</b>	<b>64</b>
<b>4.6</b>	<b>Implementierung der automatischen Parameteranpassung .....</b>	<b>66</b>
<b>5.</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>70</b>
<hr/>		
<b>5.1</b>	<b>Simulationen .....</b>	<b>70</b>
5.1.1	Generisches Modell – Ausscherendes Fahrzeug aus Kolonne.....	70
5.1.1.1	<i>Diskussion des Fahrermodells im Anwendungsfall des generischen Unfallszenarios.....</i>	<i>73</i>
5.1.2	Realunfall – Fußgängerunfall .....	74
5.1.2.1	<i>Diskussion des Fahrermodells im Anwendungsfall des ausgewählten Realunfalls .....</i>	<i>78</i>
<b>5.2</b>	<b>Schlussfolgerung.....</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>80</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>84</b>
<b>8.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>86</b>
<b>9.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
<b>10.</b>	<b>FORMELVERZEICHNIS .....</b>	<b>89</b>
<b>ANHANG.....</b>		<b>A1</b>
<hr/>		
<b>A1.</b>	<b>Das Fahrermodell .....</b>	<b>A1</b>
<b>A2.</b>	<b>Der Entscheider .....</b>	<b>A7</b>
<b>A3.</b>	<b>Das Lenkmodell .....</b>	<b>A8</b>
<b>A4.</b>	<b>Das Bremsmodell .....</b>	<b>A11</b>
<b>A5.</b>	<b>Das Kombinationsmodell.....</b>	<b>A12</b>
<b>A6.</b>	<b>Die Parameteranpassung.....</b>	<b>A15</b>

# 1. KURZFASSUNG/ABSTRACT

Einem großen Anteil der Verkehrsunfälle im Straßenverkehr liegen menschliche Fehler zu Grunde. Damit die Anzahl an Unfällen in Zukunft verringert werden kann, ist deshalb Verständnis über das menschliche Fahrverhalten notwendig.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Fahrermodells zur Simulation des menschlichen Verhaltens während dem Führen eines Personenkraftwagens. Die Programmierung des Modells erfolgt mit Matlab und der Unfallrekonstruktionssoftware PC-Crash.

Auf Grund der großen Komplexität des menschlichen Verhaltens werden dazu einige Vereinfachungen angenommen. Nur so ist es möglich eine hohe Anwendbarkeit des Modells zu garantieren, da viele Details zu simulierenden Verkehrssituationen oft nicht bekannt sind. Das entwickelte Fahrermodell besteht aus einem Entscheider, der das menschliche Entscheidungsverhalten nachahmt und je nach gegebener Verkehrssituation eines der implementierten Reaktionsmanöver auswählt.

Als Reaktionsmanöver stehen im Modell ein reines Ausweichmanöver, ein reines Bremsmanöver sowie ein kombiniertes Lenk- und Bremsmanöver zur Verfügung.

Während des Ausweichmanövers, wird ein Spurwechselvorgang auf die linke Seite ausgeführt. Aus einer Literaturstudie wurde dafür das Modell von Renski für die Umsetzung ausgewählt.

Wird das Bremsmanöver eingeleitet, so wird das Vollbremsverhalten eines menschlichen Fahrers bis zum Stillstand des Fahrzeugs simuliert.

Bei Auswahl des Kombinationsmanövers, werden Teile des Brems- und Ausweichmanövers angewendet und kombiniert.

Am Ende der Arbeit wird das entwickelte Fahrermodell an zwei ausgewählten Szenarios angewendet, um die Funktion des Modells zu zeigen. Dabei wird ein eigenes generiertes Szenario und ein reales Szenario aus der Unfalldatenbank ZEDATU angewendet. Es kann festgestellt werden, dass das entwickelte Modell unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen das menschliche Fahrverhalten gut simuliert. Zukünftig kann das Modell jedoch noch an einigen vorgeschlagenen Stellen verbessert werden, um die erreichte Simulationsqualität zu erhöhen.

## ABSTRACT

A large part of road traffic accidents are caused by human errors. To reduce the number of accidents, understanding human driving behavior is mandatory.

The goal of this master thesis is to develop a driver model for simulating human driving behavior while driving a car. The model is programmed with Matlab and the accident reconstruction software PC-Crash.

Due to the high complexity of human behavior, some simplifications have to be set. Because of the fact that many details of traffic situations are often unknown, only these restrictions can guarantee a high applicability of the model.

The developed driver model consists of a decision making unit, which simulates the decision process of the driver and decides which implemented maneuver should be selected in consideration of the actual traffic situation.

For this model three types of maneuvers are available, which can be selected from the decision making unit. Namely an evasion maneuver, a braking maneuver and a combined steering and braking maneuver.

If the evasion model is selected, a lane changing maneuver to the left side will be performed. Thereby the human steering behavior is simulated based on a steering model which was introduced and developed by Renski.

The braking maneuver, on the other hand, simulates emergency braking behavior of a human driver.

If the combination maneuver is selected, parts of the braking and evasion actions are applied and combined.

At the end of this thesis the developed driver model is applied on two selected scenarios. While the first scenario is self-generated, the second one is a real world scenario, which was selected from the accident database ZEDATU. It should be noted that the developed model simulates the human driving behavior well, as long as the specified boundary conditions are taken into account. In future, however, the model can be improved on various recommended positions, to increase the reached simulation quality.

## 2. EINLEITUNG

### 2.1 Motivation

Eine Großzahl der Unfälle im Straßenverkehr lassen sich auf menschliche Fehler zurückführen. Diese können sehr umfangreich sein und reichen zum Beispiel von nicht angepasster Geschwindigkeit über Ablenkungen bis hin zu falschem Reaktionsverhalten. So ergab eine Analyse von unterschiedlichen Verkehrsunfällen mittels *German In-Depth Accident Study (GIDAS)*, dass in 93% der untersuchten Unfälle menschliches Fehlverhalten festgestellt werden konnte. In 75% der Fälle war dies sogar die alleinige Unfallursache. [1]

Um in Zukunft die Zahl der Unfälle verringern oder gänzlich vermeiden zu können, ist es deshalb notwendig zu verstehen wie der Mensch als Fahrer auf unterschiedliche Verkehrssituationen reagiert und mit Gefahrensituationen umgeht.

Neben unterschiedlichen Studien und Versuchen vor allem auf psychologischer Ebene, eignen sich hierfür Fahrermodelle.

Sie simulieren das menschliche Verhalten des Fahrers und ermöglichen es so Aussagen über die wahrscheinliche menschliche Reaktion zu treffen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse können Vorkehrungen getroffen werden, um die Anzahl der Unfälle zu verringern. Dies kann zum Beispiel durch bauliche Maßnahmen oder durch die Entwicklung und Verbesserung von Fahrassistenzsystemen erreicht werden.

### 2.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit soll es sein ein funktionsfähiges Fahrermodell zu entwickeln, das auf ausgewählte Unfallszenarien angewendet werden kann.

Das Fahrermodell soll in Matlab programmiert werden, wobei eine enge Zusammenarbeit mit der Unfallrekonstruktionssoftware PC-Crash realisiert werden soll. So sollen benötigte Informationen sowohl über Matlab vorgegeben, als auch aus PC-Crash importiert und weiterverarbeitet werden können. Die berechneten Informationen sollen an PC-Crash übergeben werden und dort in das jeweilige Szenario integriert werden können, sodass die

in Matlab berechneten Fahrerreaktionen, in PC-Crash ausgeführt und simuliert werden können.

Zusätzlich sollen vom Modell folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- Das entwickelte Fahrermodell soll auf möglichst wenige Parameter zurückgreifen müssen, um so auch Szenarios simulieren zu können, von denen nur wenige Informationen vorhanden sind.
- Die einzusetzenden Parameterwerte, sollen der Literatur entnehmbar sein (es sollen zur Bestimmung dieser Parameterwerte keine eigenen Versuche notwendig sein)
- Das Hauptaugenmerk soll auf der Reaktion eines „normalen“ Fahrers gelegt werden, die durch Hindernisse oder andere Verkehrsteilnehmer ausgelöst wird. Verhaltenseinflüsse durch Ablenkungen (zum Beispiel durch die Verwendung eines Mobiltelefons) sollen nicht berücksichtigt werden.
- Ein gegebenenfalls nötiges Ausweichmanöver, soll so ausgeführt werden, dass bei erfolgreicher Unfallvermeidung eine Weiterfahrt möglich ist (Orientierung des Fahrzeugs).
- Die Entscheidungswahl des Reaktionsmanövers, soll auf statistischen Daten aus der Literatur basieren.

Dieses Fahrermodell kann dann zukünftig als Modul in bereits existierende Programme integriert werden, um dadurch in späterer Folge die Frage beantwortet zu können, ob in den untersuchten Szenarien und Realunfällen ein Unfall durch ein anderes Fahrverhalten während der Vorkollisionsphase verhindert werden hätte können, oder ob dies nur durch den zusätzlichen Einsatz von Umgebungserfassungssensoren möglich gewesen wäre.

## 2.3 Literaturstudie

### 2.3.1 Grundlage der Fahrermodelle

Es ist nahezu unmöglich alle Aspekte, die das menschliche Fahrverhalten beeinflussen (könnten) zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird je nach zu untersuchenden

## Einleitung

Interessensbereich das Fahrermodell auf diese Wünsche angepasst und verstärkt Rücksicht auf die dazugehörigen Einflussparameter genommen. [2]

Nach *Bauer* [2] können grundsätzlich vier große Anwendungsbereiche unterschieden werden, in denen Fahrermodelle angewendet werden.

Diese vier Bereiche sind im Folgenden angeführt. Dabei wird der Fokus auf unterschiedliche Schwerpunkt gelegt:

- Fokus am Fahrzeug: Das Hauptaugenmerk liegt in der Gestaltung des Fahrzeugs. Simulationen der Fahrzeug-Performance in unterschiedlichen Fahrsituationen sollen ermöglicht werden. Dies ist vor allem in der Fahrzeugentwicklung wichtig. [2] zit. nach [3]
- Fokus am Fahrer: In diesem Bereich wird großes Augenmerk auf den Fahrer gelegt. Es sollen Fragestellungen zu Fahrstil, Strecke und Streckenplanung bzw. zum psychologischen Zustand des Fahrers während der Fahrt beantwortet werden können. [2] zit. nach [3]
- Fokus auf der Fahrzeug-Fahrer Kombination: In diesem Punkt wird Hauptaugenmerk auf die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug gelegt. Dies ist für den Bereich der Unfallrekonstruktion und die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) entscheidend. So ist es wichtig das Fahrverhalten des Fahrers zu verstehen um FAS besser auslegen zu können bzw. um die Akzeptanz dieser Systeme zu erhöhen (*Effektivität und Akzeptanz*). [2] zit. nach [3]
- Fokus auf Umwelt und Verkehr: Diese Modelle dienen zur Simulation von unterschiedlichen Verkehrssituationen und dem Verständnis wie sie entstehen (*makroskopisches Verkehrsgeschehen*). So soll zum Beispiel die Frage beantwortet werden können wann und warum es zu Staubildung kommt. [2] zit. nach [3]

Auf Grund dieses großen Anwendungsbereichs kann es also nicht ein einziges Fahrermodell geben, das alle Anforderungen für alle Anwendungsfälle erfüllt. Es wird für jeden Fall ein eigenes Modell erstellt. [2]

Grundsätzlich bildet der Mensch beim Führen eines Fahrzeuges zusammen mit dem Fahrzeug und der Umgebung ein Gesamtsystem das sich gegenseitig beeinflusst. [4, S. 11]

Dies ist in Abbildung 2-1 dargestellt. So wird der *Fahrer* vom *Fahrzeug* durch Bewegungen und Kräfte beeinflusst, die auf ihn wirken. Von der *Umgebung* erhält er unterschiedliche visuelle Informationen. Umgekehrt beeinflusst der *Fahrer* das *Fahrzeug* über Lenkung und Pedale, sowie die *Umgebung* (zum Beispiel andere Verkehrsteilnehmer) durch seine Anwesenheit und Navigation. [4, S. 11]

Das *Fahrzeug* wird von der *Umgebung* durch Wind, Reibung und Straßenneigung beeinflusst, während es umgekehrt die *Umgebung* durch seine Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung beeinflusst. [4, S. 11]

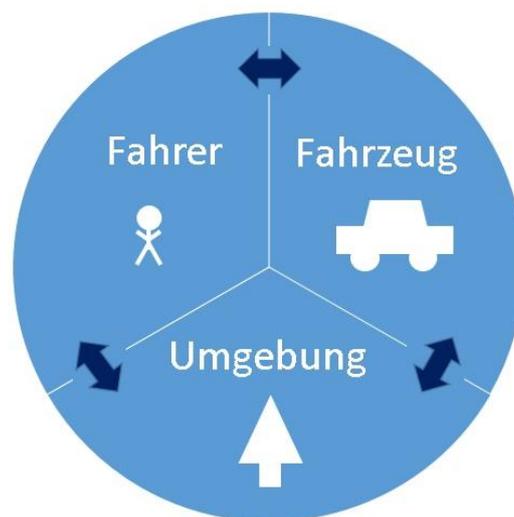


Abbildung 2-1: Zusammenhang Fahrer, Fahrzeug, Umgebung

Das prinzipielle menschliche Verhalten und Handeln lässt sich mit dem 3-Ebenen-Modell von *Rasmussen* anschaulich erklären. Es gilt für zielgerichtete Tätigkeiten zu denen auch das Führen eines Kraftfahrzeugs zählt. Demnach kann das menschliche Handeln in drei Ebenen

eingeteilt werden. Diese drei Ebenen gliedern sich in *wissensbasiertes, regelbasiertes* und *fertigkeitsbasiertes Verhalten*. [5, S. 258]

Weitere Details zur Abbildung des menschlichen Verhaltens sind der Literatur zu entnehmen.

## 2.3.2 Unterschiedliche Fahrermodelle und deren Einteilung

In der Literatur gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrermodelle und Einteilungsmöglichkeiten. In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Modelle gegeben werden.

### 2.3.5.1 Einteilung von Fahrermodellen

*Deml* [6] unterteilt die Fahrermodelle nach *aufgabenspezifische Ansätze* und *generische Ansätze*.

Bei Modellen auf Basis von *aufgabenspezifischen Ansätzen*, wird nur das Verhalten für einen bestimmten Anwendungsbereich modelliert (z.B. Autofahren). Diese Modelle können nicht allgemein eingesetzt werden. Mit Modellen auf Basis von *generischen Ansätzen* hingegen, ist es möglich, verschiedene Aspekte des menschlichen Verhaltens modellieren zu können. [6]

*Kraus* [7] wiederum nimmt eine andere Einteilung vor. Er unterteilt die Fahrermodelle in *quantitative* und *qualitative Modelle*. *Quantitative Fahrermodelle* ahmen das Verhalten eines realen Fahrers nach, während *qualitative Fahrermodelle* zur Simulation von makroskopischen Verkehrsgeschehen dienen. Sie simulieren Interaktionen von Fahrern untereinander und mit der Umwelt und dienen dazu Aussagen über Verkehrsflüsse und Verkehrsdichte treffen zu können. [7]

Mit dem Hauptaugenmerk auf den Fahrer gerichtet (*quantitative Fahrermodelle*) können Fahrermodelle zum Beispiel auf Basis von *regelungstechnischen, kognitiven* und *behavioristischen Modellen* erstellt werden.

Eine mögliche Einteilung auf Basis von *Kraus* [7] ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

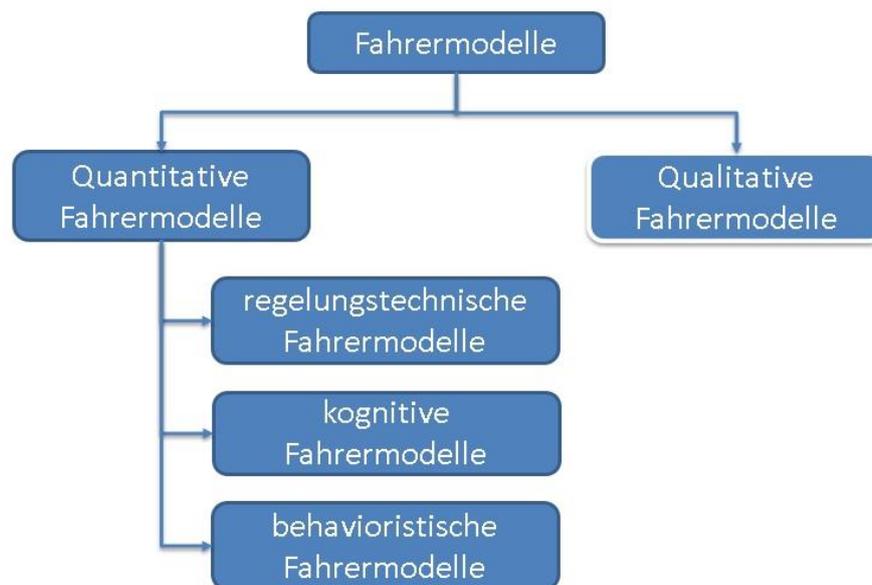


Abbildung 2-2: Mögliche Einteilung der Fahrermodelle nach [7] und [2]

### Regelungstechnische Fahrermodelle

In *regelungstechnischen Modellen* wird die Interaktion zwischen Mensch und Maschine mittels regelungstechnischer Methoden beschrieben. Sie sind grundsätzlich von den dargestellten Methoden am einfachsten aufgebaut. Es können aber nur einzelne Fahraufgaben übernommen werden, was dazu führt dass sie teilweise sehr künstlich wirken. [8, S. 231] zit. nach [9]

Generell kann das Führen eines Fahrzeuges in die drei Ebenen *Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsebene* unterteilt werden. Während der Fahrer in der *Navigationsebene* seine Fahrtroute plant, werden in der *Führungsebene* die dafür benötigten Manöver durchgeführt. Die *Stabilisierungsebene* dient der physikalischen Stabilisierung des Fahrzeugs. [10, S. 7]

Unter der Voraussetzung, dass die *Navigationsaufgabe* erfüllt wurde, können mit regelungstechnischen Fahrermodellen die Aufgaben der *Führungs- und Stabilisierungsebene* simuliert werden [11, S. 28]. Sie bilden den eigentlichen dynamischen Prozess des Fahrens ab [12, S. 19].

In Abbildung 2-3 ist ein vereinfachter Regelkreis dargestellt. Ziel ist es, dass *Aufgabe (Führungsgröße)* und *Ergebnis (Nachführgröße)* möglichst gut übereinstimmen. Um Abweichungen auszugleichen bzw. zu minimieren reagiert der *Fahrer (Regler)* und wirkt auf

## Einleitung

das *Fahrzeug (Regelstrecke)*. Dieser Eingriff des *Reglers* wird als *Stellgröße* bezeichnet. Die Abweichung wird im ersten Summenpunkt als Differenz zwischen Führungsgröße und Nachführungsgröße als *Regelabweichung* dargestellt. Die dafür benötigte *Rückmeldung (Rückkopplung)* ist typisch für eine *Regelung* und ermöglicht eine genaue Anpassung der beiden Größen. Zusätzlich können noch äußere Einflüsse Störungen auslösen. Sie werden als *Störgrößen* bezeichnet. [11, S. 28f]

Existiert keine *Rückkopplung*, so spricht man von einer *Steuerung*. Sie ermöglicht eine schnellere Reaktion, ist aber ungenauer als die *Regelung*. Autofahren soll nach Möglichkeit auf einer Doppelstrategie basieren, bei der schnelle Reaktionen ungenau erfolgen (*Steuerung*), während für präzises Fahren eine *Regelung* nötig ist. [11, S. 28f]

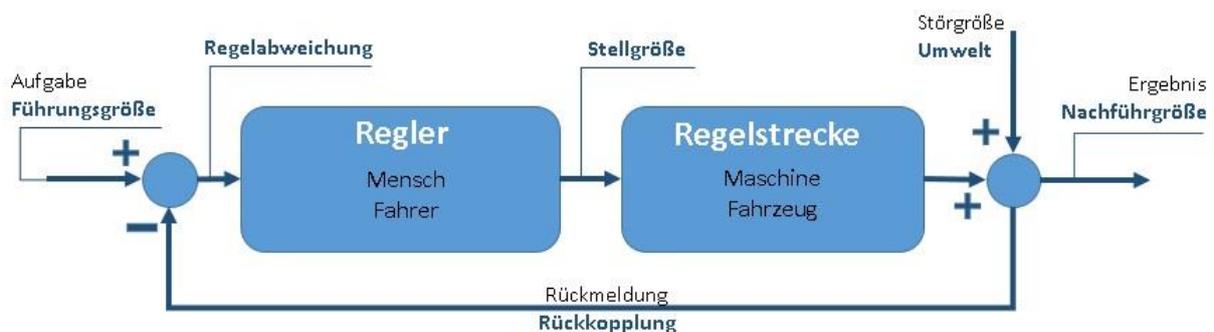


Abbildung 2-3: vereinfachtes Regelkreisbild (vgl. [11, S. 29])

Befindet sich der Summenpunkt zur Bestimmung der Regelabweichung, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, außerhalb des *Reglers (Menschen)*, so wird die sich ergebende Differenz angezeigt und der Mensch muss diese minimieren. In diesem Fall spricht man von einer *Kompensationsaufgabe*. [11, S. 30]

Liegt der Summenpunkt erst im *Regler* (d.h. der Mensch muss die Größen mental zusammenführen), so spricht man von einer *Folgeaufgabe*. [11, S. 30]

Ein grundlegendes Beispiel für ein *regelungstechnisches Fahrermodell* bildet das *Zweiebenen-Modell* von *Donges*. Das Modell besteht aus einer *antizipatorischen Steuerung* und einer *kompensatorischen Regelung*. Wobei die *antizipatorische Steuerung* die *Führungsebene* und die *kompensatorische Regelung* die *Stabilisierungsebene* abbildet. Erkennt der Fahrer eine Kurve im Straßenverlauf voraus, so wird er zuerst aus seiner Erfahrung heraus einen als geeignet angenommenen Lenkwinkel einschlagen

(*antizipatorischen Steuerung*). Dieser Wert wird dann beim Durchfahren der Kurve fortlaufend angepasst und nachgeregelt (*kompensatorische Regelung*). [13, S. 230f]

Dieser Vorgang ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

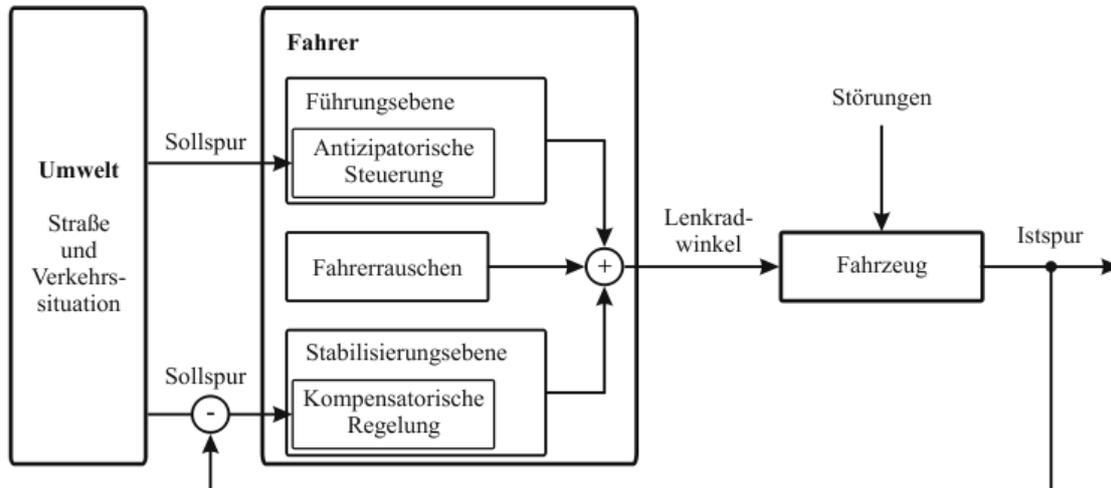


Abbildung 2-4: Zweiebenenmodell der Lenkregelung [13, S. 230]

### Kognitive Fahrermodelle

*Kognitive Modelle* modellieren menschliches Verhalten auf Basis von internen menschlichen Faktoren wie Aufmerksamkeitsspanne oder mentale Belastung. Sie stellen die menschliche Informationsverarbeitung dar und versuchen das menschliche Denken wieder zu spiegeln.

*Kognitive Modelle* gelten zwar als psychologisch valide, sind aber sehr komplex. [2]

Beispiele dafür sind unter anderem *ACT-R*, *SOAR*, *QN-MHP* oder *COSMODRIVE* [8, S. 231].

Auf Grund der expliziten Modellierung der mentalen Komponente des Fahrers, können unterschiedliche Geisteszustände des Fahrers berücksichtigt werden. So kann zum Beispiel der Faktor Eile oder mentale Zustände wie Müdigkeit oder Ablenkung berücksichtigt und simuliert werden. Außerdem können die Leistungsgrenzen des menschlichen Gehirns bei der gleichzeitigen Durchführung unterschiedlicher Aufgaben simuliert werden. [2]

Durch die angesprochene hohe Komplexität werden sehr viele Daten benötigt. So ist es zum Beispiel notwendig sehr detaillierte Information zu den Fahrmanövern zur Verfügung zu stellen. Dies führt zu langen Rechenzeiten und großen Ressourcenbedarf. Solche Anforderungen sind aber oft nicht möglich, da zum Beispiels Ergebnisse innerhalb kurzer Zeit vorliegen sollen und so keine langen Rechenzeiten möglich sind. [2]

## Einleitung

Exemplarisch für ein *kognitives Modell*, soll *ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational)* näher vorgestellt werden.

*ACT-R* ist eine der weitverbreitetsten Architekturen in der Fahrermodellierung. Sie setzt sich aus den drei Hauptkomponenten *Modules*, *Buffer* und *Pattern Matcher* zusammen und wird in Abbildung 2-5 überblicksmäßig dargestellt. [2]

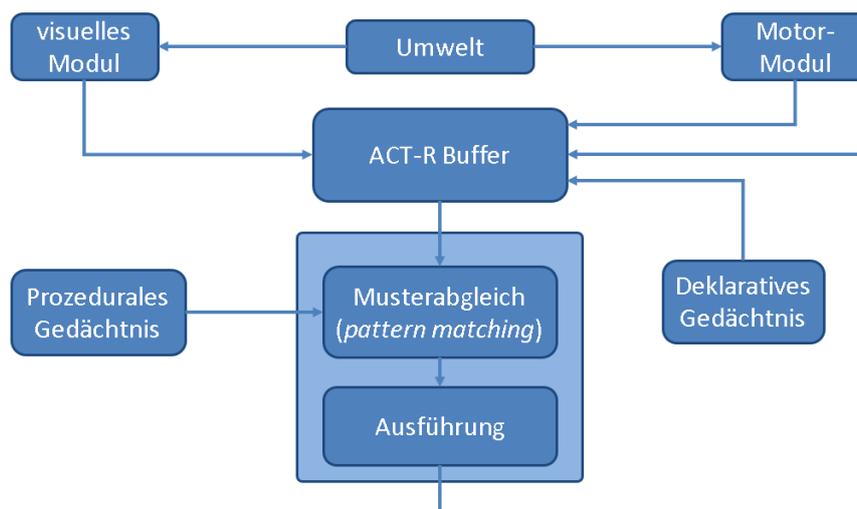


Abbildung 2-5: Prinzipieller Aufbau ACT-R (vgl. [2])

*Perceptual-motor modules* bilden die Schnittstelle zur Umwelt und ermöglichen eine Interaktion mit der Umgebung. Während das *visuelle Modul* die Informationen aus visuellen Sensoren erhält, kontrolliert das *Motormodul* Gas und Bremspedal. [2]

Dabei beinhaltet *ACT-R* zwei Arten von Gedächtnismodule die das *deklarative* und *prozedurale Gedächtnis* simulieren. Während das *deklarative Gedächtnis* das gesamte Faktenwissen der Person beinhaltet, handelt es sich im *prozeduralen Gedächtnis* um Handlungswissen, mit dem es möglich ist Aktionen auszuführen. Hier können spezifische Fahrmanöver gespeichert werden. [2]

Zur Kommunikation besitzt jedes Modul einen *Buffer*, der den aktuellen Zustand abbildet. Der *Pattern Matcher* ist für eine Änderung dieser Zustände zuständig und vergleicht alle *Buffer* nach Übereinstimmungen mit dem *prozeduralen Gedächtnis*. Dann wird der am besten Passendste ausgewählt. Der *Pattern Matcher* kann so zum Beispiel zwischen unterschiedlichen Fahrmanövern und Strategien für dasselbe Manöver auswählen. [2]

Jeder *Buffer* kann jedoch nur eine Wissenseinheit aufnehmen, die den aktuellen Modulzustand repräsentiert. Diese Tatsache ermöglicht es, die menschliche Ressourcenbegrenzung zu simulieren. [6]

### **Behavioristische Fahrermodelle**

*Behavioristische Modelle* beobachten messbares menschliches Verhalten und versuchen daraus mögliche Verhaltensabsichten zu schließen. Beispielen dafür sind Modelle auf Basis von *neuronalen Netzwerken*, *bayes'schen Netzwerken*, oder *fuzzy logic*. [2]

Das Modell versucht die Absicht des Fahrers durch Aufzeichnung der Handlungen mit den Kontrollelementen (z.B. Lenkrad) abzuleiten. Interne menschliche Zustände werden jedoch nicht berücksichtigt. [2]

Um das Modell in der Lernphase richtig zu leiten und zu kontrollieren, damit richtige Schlüsse gezogen werden, ist sehr viel Erfahrung notwendig. Nur so kann ausgeschlossen werden, dass das Modell keine falschen Rückschlüsse zieht. [2]

Im Folgenden werden die genannten Beispiele von behavioristischen Fahrermodellen näher erläutert.

*Neurale Netzwerke* sind nach dem Vorbild der Vernetzung der Nervenzellen im Gehirn aufgebaut. Sie bestehen aus *Neuronen (Knoten)*, bei denen es sich um einzelne Berechnungselemente handelt, die Informationen speichern können. Diese *Knoten* sind durch sogenannte *Kanten (edges)*, die unterschiedlich gewichtet werden können, verbunden. Je größer die Gewichtung, umso stärker ist der Einfluss auf den Nachbarknoten. Der Zustand jedes Knotens wird aus den Aktivitätslevels der Nachbarknoten und deren Gewichtungen berechnet. Dabei besteht das Netzwerk aus mehreren Schichten von Knoten, die die letzte Schicht (Ausgabeschicht), welche das Ergebnis liefert kettenartig beeinflussen. Während einer Lernphase mit bekannten Ein- und Ausgangsdaten werden die Gewichtungen zwischen den Knoten nach bestimmten Lernregeln verändert und angepasst. Nachdem das Netzwerk trainiert wurde, kann es in weiterer Folge selbstständig Ausgabewerte berechnen. [2]

*Bayes'sche Netzwerke* sind wahrscheinlichkeitsbasierte Modelle. Die Abhängigkeiten werden durch bedingte Wahrscheinlichkeiten von Variablen bestimmt. Das System kann verwendet werden, um Fahrmanöver vorherzusagen. So kann zum Beispiel mit den Variablen *Richtung*, *Lenkbewegung* und *Fahrgeschwindigkeit* die Wahrscheinlichkeit für ein Umkehrmanöver berechnet werden. [2]

Ein Vorteil dieses Fahrermodells besteht darin, dass es sehr gut mit unerwarteten Situationen, die in der Fahrermodellierung immer wieder vorkommen können, umgehen kann. So ist es mit diesem Modell möglich zu berücksichtigen, dass Fahrer in gleichen Situationen oft unterschiedlich reagieren. [2]

*Fuzzy logic* ist eine Art von logischer Abschätzung. Dabei handelt es sich nicht um eine exakte Berechnung. Der größte Vorteil von *fuzzy logic* ist die Ähnlichkeit zum menschlichen Denkverhalten. Es ist möglich Fuzzy-Modelle zu konstruieren, die ein sehr realistisches Modell liefern. Dabei steigt die Qualität je besser die verwendeten Variablen und Regeln das menschliche Verhalten im betrachteten Manöver beschreiben. Das ist aber auch eine der größten Schwierigkeiten dieses Modells, da dadurch ein sehr hoher Grad an Fachwissen notwendig ist, um die Fuzzy-Variablen und die Regeln passend festlegen zu können. Deshalb werden für die Festlegung der Variablen und Regeln in den meisten Fällen Experten herangezogen. [2]

Im Fall von menschlicher Denkmuster ist es sehr problematisch feste, klar abgegrenzten Variablen zu verwenden. *Fuzzy logic* ermöglicht es zum Beispiel mit Trapezfunktionen solch einen Übergangsbereich zu schaffen. [2]

### **2.3.5.2 Beispiele für Fahrermodelle aus der Literatur**

Aus der Vielzahl von unterschiedlichen Fahrermodellen, die in der Literatur vorhanden sind, sollen in diesem Kapitel ein paar ausgewählte vorgestellt werden.

### Spurführungsmodell von Saleh

Das Modell basiert auf der Annahme, dass im *neuromuskulären System (NMS)* des Fahrers, ein geeignetes *Lenkmoment*  $\Gamma_d$  erzeugt wird, um einen gewünschten *Lenkwinkel*  $\hat{\delta}_{sw}$  zu erreichen. [14]

Der grundsätzliche Aufbau des Modells ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Steuerungsaufgabe aus einem *kompensatorischen Teil*  $G_c$ , der vom Nahwinkel  $\theta_{near}$  und einen *antizipatorischen Teil*  $G_a$ , der vom Fernwinkel  $\theta_{far}$  abhängig ist, besteht. [14]

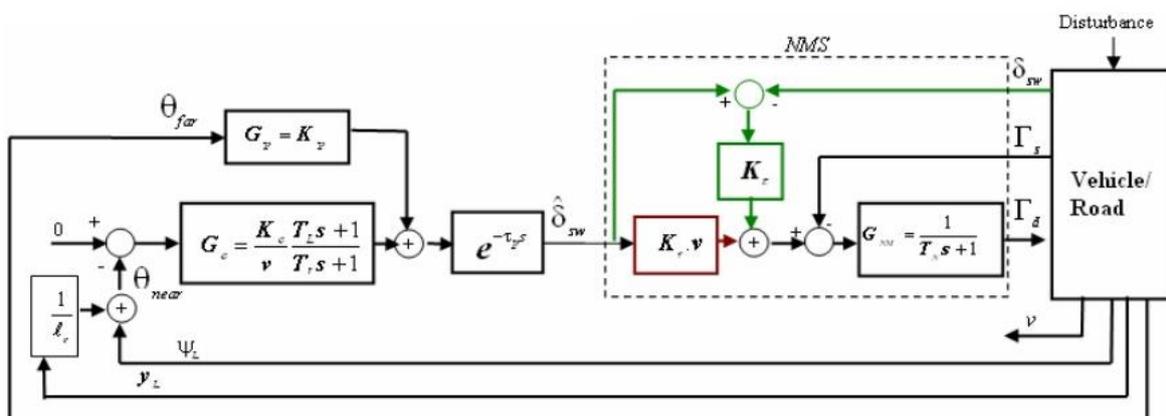


Abbildung 2-6: Spurführungsmodell nach Saleh [14]

Das *neuromuskuläre System* gibt den Lenkbefehl unter Berücksichtigung einer kinästhetischen Rückmeldung. Dies ist für den Fahrer wichtig, um rasch erforderliche Anpassungen durch unerwartete Straßensituationen oder Windböen zu erkennen. Zusätzlich wird eine *Drehmomentrückmeldung*  $\Gamma_s$  auf das Lenkrad, das durch die Straßenkontaktkräfte hervorgerufen wird, berücksichtigt. Diese Information kann der Fahrer nutzen, um die Lenkung zu stabilisieren. [14]

Im Modell liefert das NMS ein Lenkmoment proportional zum gewünschten *Lenkwinkel*  $\hat{\delta}_{sw}$  und zur *Fahrzeuggeschwindigkeit*  $v$  (Verstärkung  $K_r \cdot v$ ). Es wird auch angenommen, dass das NMS (durch einen einfachen *Verstärkungsfaktor*  $K_t$ ) überprüft, dass der gewünschte Lenkwinkel auf das Lenkrad angewendet wird. Der Verstärkungsfaktor hat die Aufgabe, die Differenz zwischen ausgeführten Winkel und erwünschten Winkel auszugleichen. Zusätzlich wird noch ein *neuromuskulärer Dynamik-Anteil*  $G_{NM}$  berücksichtigt. [14]

## Fahrermodell nach Hess

Dieses Fahrermodell berücksichtigt nur das Lenkverhalten des Fahrers und besteht aus einem Hochfrequenz- und Niederfrequenzkompensationsteil [15]. Dies ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

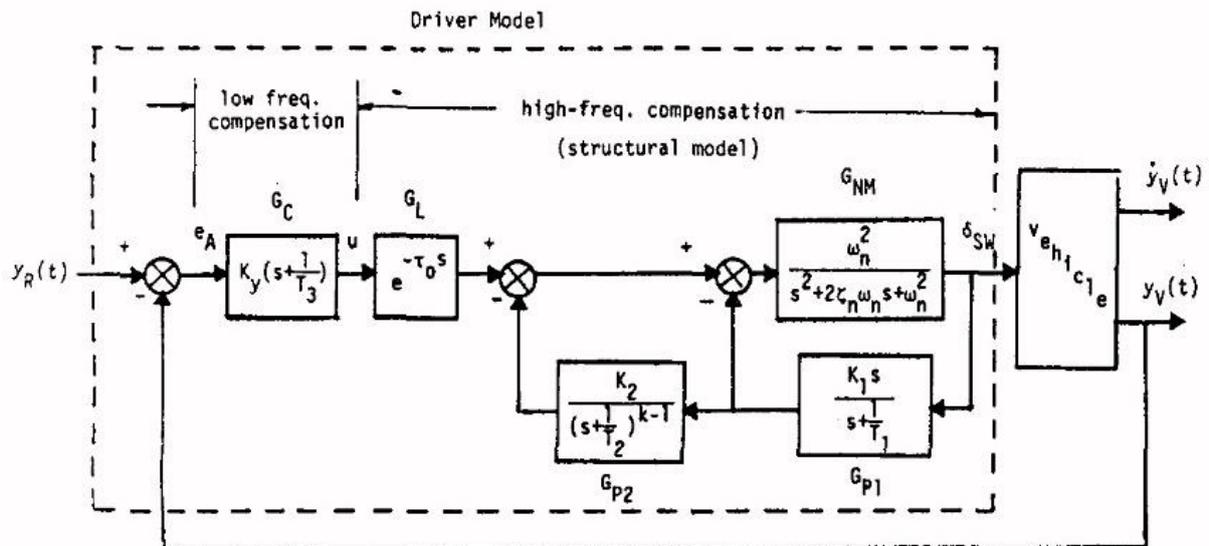


Abbildung 2-7: Fahrermodell nach Hess [15]

Während die Niederfrequenzkompensation durch einen *Open-Loop* mit dem  $G_C$ -Block realisiert wird, besteht der Hochfrequenzkompensationsbereich aus mehreren Blöcken. So wird mit Hilfe des  $G_L$ -Blocks die Zeitverzögerung simuliert, die im menschlichen Körper entsteht. Der  $G_{NM}$ -Block simuliert das neuromuskuläre System der Fahrerarme und gibt den Lenkwinkel  $\delta_{SW}$  aus. Er wird jedoch vom  $G_{P1}$ -Block und  $G_{P2}$ -Block beeinflusst. [15]

Der  $G_{P1}$ -Block verarbeitet, den Lenkwinkel  $\delta_{SW}$  aus dem neuromuskulären System, der auch als Ausgabewert des Fahrermodells dient. Das daraus erhaltene Resultat wird im  $G_{P2}$ -Block verarbeitet. Diese beiden Blöcke stellen die Rückmeldungen dar, aus der die Bewegung menschlicher Gliedmaßen und Muskelgewebe abgeleitet werden kann. [15]

## Lenkmodell nach Renski

Auf Basis des in Abbildung 2-8 dargestellten Lenkgesetzes entwickelte *Andrzej Renski* ein Lenkmodell, mit dem es möglich ist, dass menschliche Lenkverhalten zu simulieren.

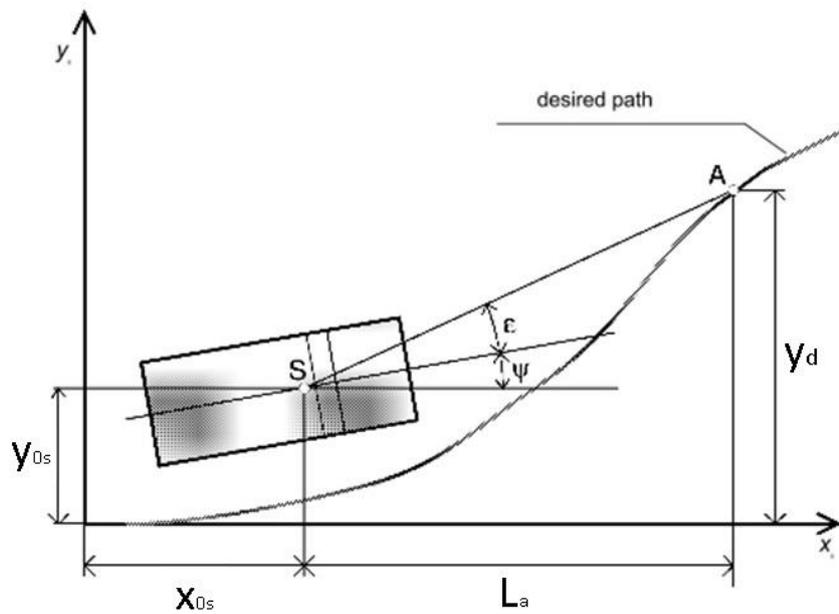


Abbildung 2-8: Graphische Darstellung des Lenkgesetzes [16]

Der grundsätzliche Aufbau dieses Lenkmodells ist in Abbildung 2-9 als Blockdiagramm dargestellt und lässt sich mathematisch wie in Formel (2-1) angeführt darstellen. [16]

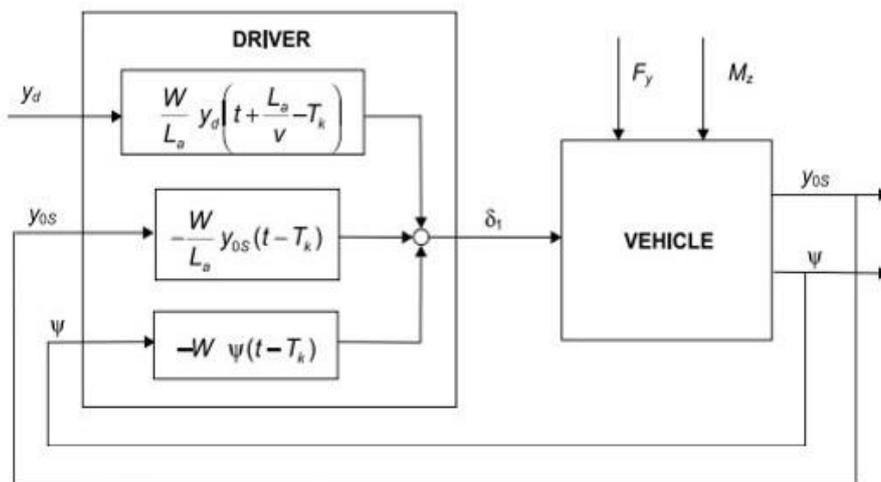


Abbildung 2-9: Blockdiagramm des Lenkmodells nach Renski [16]

$$\delta_1(t) = \frac{W}{L_a} * y_d \left( t + \frac{L_a}{v} - T_k \right) - \frac{W}{L_a} * y_{0s} (t - T_k) - W * \psi (t - T_k) \quad (2-1)$$

## Einleitung

Wie sowohl aus Formel (2-1) als auch aus Abbildung 2-9 ersichtlich, wird der *Lenkradwinkel*  $\delta_1$  von drei Werten entscheidend beeinflusst. Dabei handelt es sich um den *y-Abstand der idealen Ausweichtrajektorie zum Vorausschaupunkt*  $y_d$ , den *aktuellen y-Abstand des Fahrzeugs*  $y_{0s}$  und den *aktuellen Gierwinkel*  $\psi$  des Fahrzeuges. Diese Werte sind zum besseren Verständnis in Abbildung 2-8 graphisch dargestellt. Weiters werden noch die *Lenkwinkelverstärkung*  $W$ , die *Vorausschaudistanz*  $L_a$  und die *Fahrzeuggeschwindigkeit*  $v$  benötigt um den Lenkradwinkel berechnen zu können. [16]

Die das Lenkmodell beschreibende Formel (2-1) lässt sich wie im Folgenden erklärt herleiten. Für den *Lenkradwinkel*  $\delta_1$  gilt nach *Renski* die in Formel (2-2) dargestellte Beziehung.

$$\delta_1(t) = W * \varepsilon(t - T_k) \quad (2-2)$$

Dabei ist  $\varepsilon$  näherungsweise jener Winkel, unter dem der Fahrer den Punkt des *y-Abstandes* der idealen Ausweichtrajektorie  $y_{0s}$  sieht. Dieser Winkel ist in Abbildung 2-8 dargestellt und wird *Sichtwinkel* genannt.

Aus Abbildung 2-8 lässt sich ebenfalls erkennen, dass für die *Gegenkathete*  $y_\alpha$  des gedachten rechtwinkligen Dreiecks Formel (2-3) gilt.

$$y_\alpha = y_d - y_{0s} \quad (2-3)$$

Anschaulicher lässt sich diese Beziehung in Abbildung 2-10 darstellen. Hier wurden die Winkelbeziehungen aus Abbildung 2-8 gesondert dargestellt und das gedachte rechtwinklige Dreieck eingezeichnet.

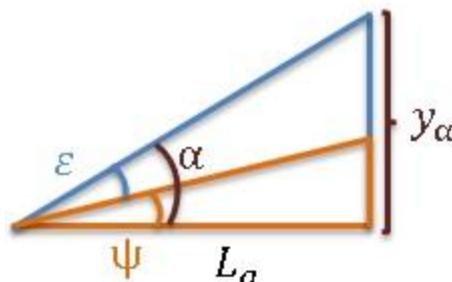


Abbildung 2-10: Winkelbeziehungen

Daraus kann der *Sichtwinkel*  $\varepsilon$  über die Beziehung aus Formel (2-4) berechnen werden.

$$\varepsilon = \alpha - \psi \quad (2-4)$$

Der benötigte *Winkel*  $\alpha$  lässt sich über die trigonometrische Formel des Tangens nach Formel (2-5) berechnen.

$$\tan \alpha = \frac{y_\alpha}{L_a} \quad (2-5)$$

Unter der Annahme kleiner Winkeländerungen gilt Beziehung (2-6).

$$\tan \alpha = \alpha \quad (2-6)$$

Aus Formel (2-3), Formel (2-5) und Formel (2-4) ergibt sich der *Sichtwinkel*  $\varepsilon$  gemäß *Renski* nach Formel (2-7).

$$\varepsilon(t) = \frac{y_d(x_{0s} + L_a) - y_{0s}(x_{0s})}{L_a} - \psi(x_{0s}) \quad (2-7)$$

Formel (2-7) bildet die Basis für das erzeugte Lenkmodell. Wird sie in Formel (2-2) eingesetzt, so ergibt sich die das Lenkmodell beschreibende Formel (2-1).

Einen guten Überblick über weitere unterschiedliche Fahrermodelle und deren Ansätze liefert *Plöchl und Edelmann* [3].

### 2.3.3 Das Ausweichmanöver

Bei Manövern zur Abwendung von Kollisionen durch Lenkbewegungen, muss grundsätzlich zwischen reiner Kollisionsvermeidung und Ausweichen unterschieden werden. Während es

## Einleitung

bei der Kollisionsvermeidung nur darum geht den Zusammenstoß zu verhindern, wird beim Ausweichmanöver darauf geachtet, dass im Falle eines erfolgreich ausgeführten Manövers, das Fahrzeug weiterfahren kann. Das bedeutet, dass das Fahrzeug die Fahrbahn nicht verlassen darf und in die ursprüngliche Fahrtrichtung orientiert bleiben muss. [17, S. 27]

Der Ausweichvorgang ist (gleich wie ein Spurwechselvorgang) so aufgebaut, dass es zuerst zu einer Auslenkung kommt, bei der der Lenkwinkel bis zu einem bestimmten Maximalwert zunimmt und dann wieder bis auf null (Geradausfahrt) abnimmt. In diesem Punkt wird der größte *Gierwinkel*  $\psi$  erreicht. Im nächsten Schritt wird wieder in die Gegenrichtung zurückgelenkt, bis die ursprüngliche Orientierung erreicht ist. [18, S. 145]

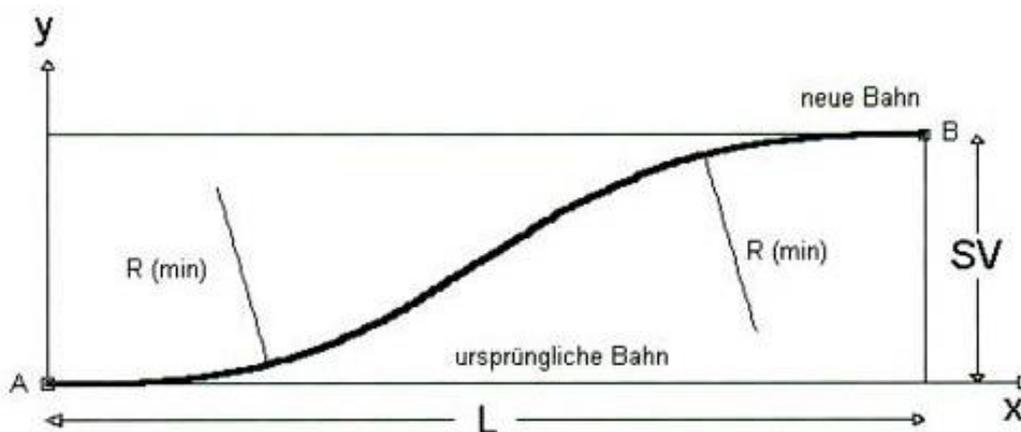


Abbildung 2-11: Aufbau der Ausweichtrajektorie [18, S. 145]

Für die in Abbildung 2-11 dargestellte Art der Ausweichtrajektorie gibt es mehrere Ansätze. Die mathematisch einfachste Möglichkeit besteht darin zwei Kreissegmente aneinanderzureihen. Dies führt jedoch zu zwei Problemen: Zum einen ist der tatsächlich auftretende kleinste Radius kleiner als in der Realität, zum anderen ist diese Ausweichtrajektorie praktisch nicht umsetzbar. Beim Übergang zwischen Gerade und Kurvenssegment bzw. zwischen den beiden Kurvenssegmenten, kommt es zu einem Sprung im Lenk(-rad)-winkel. Dieser Sprung lässt sich in der Realität nicht durchführen, da für das Einlenken bis zum erforderlichen Lenkwinkel eine bestimmte Zeit notwendig ist, da die Lenkrate nicht unendlich groß werden kann. Eine weitere Möglichkeit wäre es die

Trajektorie über ein Polynom n-ten Grades anzusetzen und mit Hilfe von Randbedingungen herzuleiten.[17, S. 27–31]

Im Straßenverkehr werden jedoch häufig Klothoiden verwendet. Da von *Spindler* nachgewiesen werden konnte, dass tatsächlich klothoidenähnliche Kurven gefahren werden, ist es naheliegend eine Wendeklothoide als Ausweichtrajektorie zu verwenden. Diese Wendeklothoiden können in der mathematischen Anwendung jedoch sehr kompliziert werden. Aus diesem Grund hat es sich eingebürgert eine schräge Sinus- bzw. Kosinuslinie, die die Wendeklothoide sehr gut annähert, zu verwenden.[18, S. 145f]

Die Gleichung der schrägen Sinuslinie, mit der es also möglich ist eine Ausweichtrajektorie nach Abbildung 2-11 mathematisch zu beschreiben, lautet wie folgt:

$$y = Sv * \left( \frac{x}{L} - \frac{1}{2\pi} * \sin \frac{2\pi * x}{L} \right) \quad (2-8)$$

Wenn ein bestimmter *Seitenversatz Sv* gewünscht wird und zusätzlich eine bestimmte *Fahrgeschwindigkeit v* vorgegeben ist, muss jedoch erst die *erforderliche Länge L* für das Ausweichmanöver berechnet werden, sodass die maximal erlaubte Querschleunigung nicht überschritten wird.

Die *erforderliche Länge L* lässt sich nach *Gratzer und Becke* [18, S. 146] aus Formel (2-9) berechnen:

$$L^4 + Sv * L^2 - \left( 2\pi * Sv * \frac{v^2}{a_q} \right)^2 = 0 \quad (2-9)$$

Es lässt sich erkennen, dass die Ausweichtrajektorie neben dem gewünschten *Seitenversatz Sv*, von der *Fahrzeuggeschwindigkeit v* und der maximalen *Querschleunigung a<sub>q</sub>* abhängig ist.

Die Auswirkung der Geschwindigkeit ist in Abbildung 2-12 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Kurve umso langgezogener wird, je größer die Geschwindigkeit ist.

## Einleitung

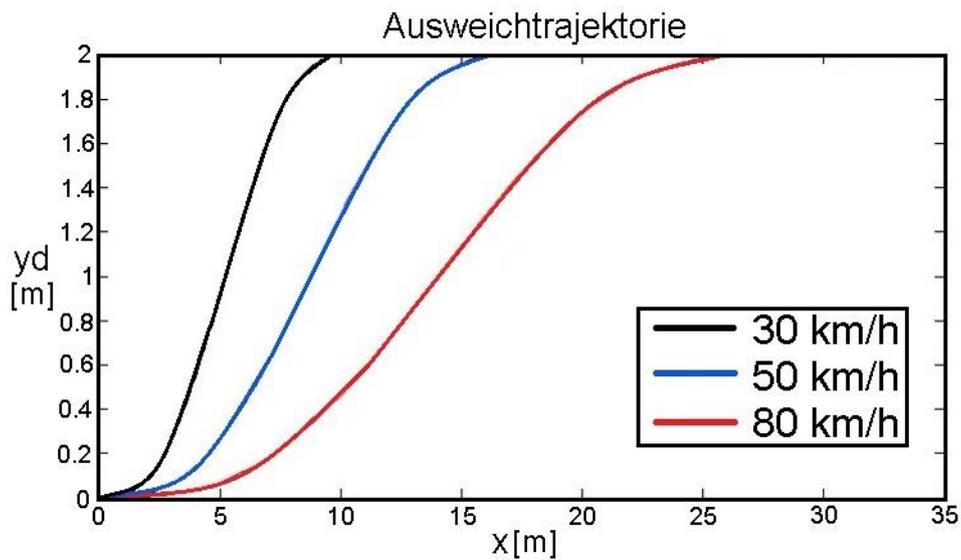


Abbildung 2-12: Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Dies ist ebenfalls aus Formel (2-9) ersichtlich. Wenn die *Geschwindigkeit*  $v$  zunimmt, so nimmt der Subtrahend der Formel zu. Damit sich trotzdem das gleiche Ergebnis ergibt, muss auch der Minuend zunehmen, welcher von der *erforderlichen Länge*  $L$  anhängig ist.

In Abbildung 2-13 ist der Einfluss der *Querbeschleunigung*  $a_q$  dargestellt. Diese hängt nach Formel (2-10) vom *Reibungskoeffizienten*  $\mu$  zwischen Reifen und Straße und der *Erdbeschleunigung*  $g$  ab.

$$a_q = \mu * g \quad (2-10)$$

Da der *Reibungskoeffizient*  $\mu$  mit schlechteren Witterungsbedingungen abnimmt, nimmt auch die maximale *Querbeschleunigung*  $a_q$  ab. Dies hat zur Folge, dass die Abweichtrajektorie langgezogener wird.

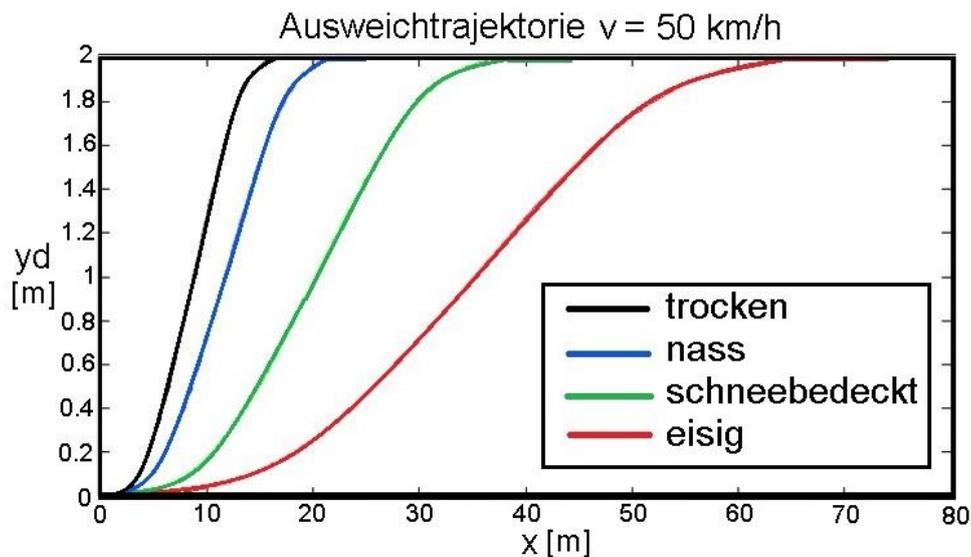


Abbildung 2-13: Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse

In Tabelle 2-1 wird exemplarisch der erforderliche Weg für einen *Seitenversatz* von 3 m für unterschiedliche *Geschwindigkeiten* und *Querbeschleunigungen* dargestellt. Man kann erkennen, dass sich im Speziellen für höhere *Geschwindigkeiten* die tatsächliche Trajektorienlänge und der Platzbedarf in Längsrichtung der Straße nur gering unterscheiden. Auch für geringe *Geschwindigkeiten* ist der Unterschied vernachlässigbar klein. Für einen geringeren vorgegebenen *Seitenversatz* verringert sich der Unterschied noch einmal. Aus diesem Grund kann vereinfacht angenommen werden, dass gilt  $v=v_x$ .

Tabelle 2-1: Benötigter Weg in Meter für einen Seitenversatz von 3 m [18, S. 147]

v [km/h]	Querbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]					
	0,5	1	1,5	2	3	4
20	34,2 (34,0)	24,3 (24,0)	19,9 (19,6)	17,3 (16,9)	14,3 (13,8)	12,4 (11,9)
30	51,3 (51,1)	36,3 (36,1)	29,7 (29,5)	25,8 (25,5)	21,1 (20,8)	18,3 (18,0)
40	68,3 (68,2)	48,3 (48,2)	39,5 (39,3)	34,2 (34,0)	28,0 (27,8)	24,3 (24,0)
50	85,3 (85,2)	60,4 (60,3)	49,3 (49,2)	42,7 (42,6)	34,9 (34,8)	30,3 (30,1)
70	119,4	84,5 (84,4)	69,0 (68,9)	59,8 (59,7)	48,8 (48,7)	42,3 (42,2)
100	170,6	120,6	98,5	85,3	69,7 (69,6)	60,4 (60,3)

## Einleitung

Für die Ausführung eines Ausweichmanövers ist eine vom Fahrzeuglenker benötigte Lenkreaktionszeit erforderlich. Diese Lenkreaktionszeit ist im Allgemeinen kürzer als die Bremsreaktionszeit. Gründe dafür sind zum einen darin zu suchen, dass die Reizlänge vom Kopf bis zu den Armen kürzer ist als bis zu den Beinen und somit weniger Übertragungszeit benötigt [19, S. 110]. Den weitaus größeren Anteil macht aber die Tatsache aus, dass für den Lenkvorgang keine *Umsetzzeit* berücksichtigt werden muss [20].

Versuche der *technischen Universität Braunschweig* haben ergeben, dass die Reaktionszeiten stark von der Umgebung abhängig sind und im städtischen Raum am geringsten sind. Im ländlichen Raum und besonders auf Autobahnen nehmen die Reaktionszeiten zu. Erklärt wird dies über die Kritikalität der Situationen. Desto kritischer die Fahrsituation für den Fahrer erscheint, umso geringer ist die Reaktionszeit. Auf Grund der infrastrukturellen Gegebenheiten und Anzahl der Verkehrsteilnehmer, befindet der Mensch städtischen Raum als sehr kritisch. Die gemessenen Lenkreaktionswerte lagen zwischen 572 und 952 ms. [21, S. 50]

Theoretisch können in Längs- und Querrichtung gleich hohe Beschleunigungen erreicht werden. Unabhängig von technischen Einschränkungen (*Kamm'scher Kreis*), wird ein normaler Autofahrer in der Realität jedoch nie so große Querbeschleunigungswerte erreichen, wie er in Längsrichtung durchführt. Dies ist vor allem auf psychologische Gründe zurückzuführen und lässt sich mit dem Sicherheitsgefühl des Fahrers erklären. Die maximale Querbeschleunigung hängt dabei stark von der Art des durchgeführten Fahrmanövers ab und kann höchst unterschiedliche Werte annehmen. So liegt für Kurvenfahrten die obere Grenze für Normalfahrer bei zirka  $4\text{-}5 \text{ m/s}^2$ . Für Spurwechselmanöver hingegen wird jedoch nur ein mittlerer Wert von  $2 \text{ m/s}^2$  erreicht. Dieser Wert ist relativ klein, wenn man bedenkt, dass bei einem Vollbremsmanöver in Längsrichtung Verzögerungen bis zu  $10 \text{ m/s}^2$  auftreten können. Der Grenzwert lässt sich damit erklären, dass darüber bereits relativ große Einschwingphasen in der neuen Fahrspur erforderlich sind, welche vom Fahrer als unangenehm aufgefasst werden und deshalb vermieden werden. [22]

In Abbildung 2-14 ist die Querbeschleunigung bei Spurwechselmanövern über der Geschwindigkeit dargestellt. Man erkennt, dass bei normalen Spurwechselforgängen eine

Querbewschleunigung von ca.  $1 \text{ m/s}^2$  erreicht wird, während sich der Wert bei scharfen Spurwechselmanövern auf etwa  $2 \text{ m/s}^2$  erhöht. Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit ist dabei relativ gering.

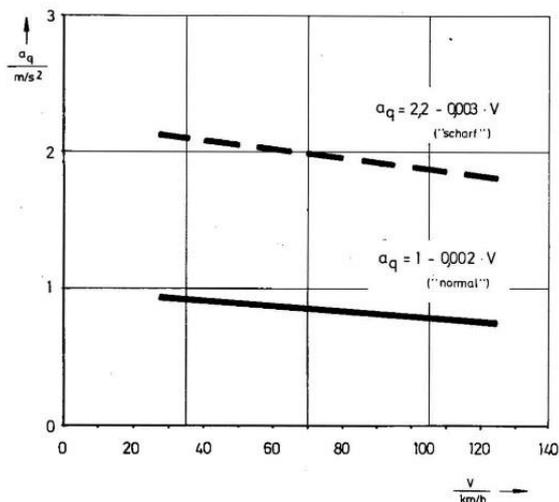


Abbildung 2-14: Maximale Querbewschleunigung bei Spurwechselmanöver [22]

### 2.3.4 Das Bremsmanöver

Mit Hilfe eines Bremsmanövers ist es möglich die Geschwindigkeit zu reduzieren und im Idealfall vor dem Hindernis zum Stillstand zu kommen, um so einen Unfall zu vermeiden.

Dabei lässt sich der Bremsvorgang nach [18, S. 127] grob in drei Phasen einteilen, die im Folgenden näher erklärt werden:

1. Reaktionsphase (konstante Anfangsgeschwindigkeit)
2. Bremswellphase (linearer Anstieg der Bremsverzögerung von 0 auf a)
3. Vollbremsphase (Verzögerung ist konstant)

Abbildung 2-15 gibt einen Überblick über den Verlauf der Verzögerung während der einzelnen Phasen.

## Einleitung

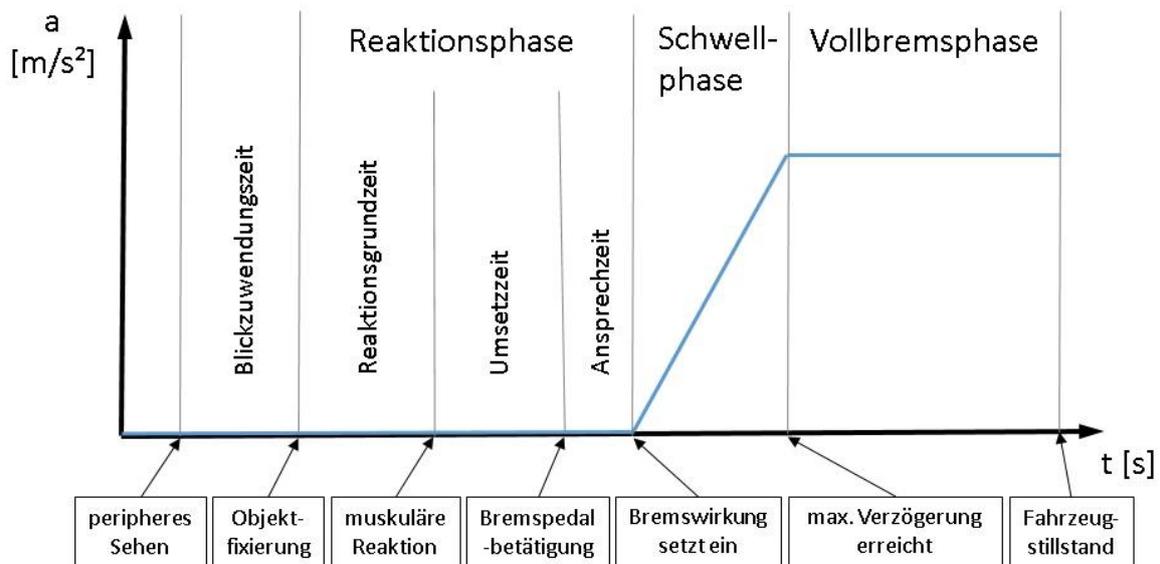


Abbildung 2-15: Phasen und Verzögerungsverlauf während des Bremsvorgangs (vgl. [23, S. 237],[24, S. 54])

### Die Reaktionsphase

Die Reaktionsphase beinhaltet jenen Zeitbereich, den der Fahrer benötigt, um ab Erkennen der Gefahr das Bremsmanöver einzuleiten. Die *Reaktionszeit* selbst beginnt erst mit der Gefahrenerkennung. Das heißt, wendet der Fahrer seinen Blick vom Verkehrsgeschehen ab bzw. befindet sich das Gefahrenobjekt außerhalb des Blickfeldes des Fahrers, muss der *Reaktionszeit* eine *Blickzuwendungszeit* vorgelagert werden, um auch die Zeit berücksichtigen zu können, die vergeht, bis das Hindernis erkannt wird, bevor überhaupt eine Reaktion erfolgen kann. [18, S. 126]

Grundsätzlich sieht der Mensch nur in einem sehr geringen Bereich scharf. Dieser Bereich liegt etwa in einem Bereich von 1 bis 1,5 Grad um den zentralen Sehbereich und wird *fovea centralis* genannt. [23, S. 240]

Befindet sich das Gefahrenobjekt außerhalb dieses zentralen Blickfeldes des Fahrers (*foveales Sehen*) in der *peripheren Wahrnehmung*, hängt die zusätzlich benötigte *Blickzuwendungszeit* davon ab, in welchem Bereich sich das Objekt befindet. Man unterscheidet zwischen Blickzuwendung unter 5° und Blickzuwendung über 5°. Bei einer erforderlichen Blickzuwendung von mehr als 5° ist zusätzlich zur *Blickzuwendungszeit*, die auch bei einer Blickzuwendung unter 5° nötig ist und zwischen 0,32 s und 0,55 s liegt, noch

eine zusätzliche Zeit zwischen 0,09 s und 0,15 s notwendig, die sich aus einer erforderlichen *Korrektursakkade* des Auges ergibt. Bei einer Blickzuwendung über 5° kann das Objekt nämlich nicht mehr durch einen einzelnen Blicksprung erkannt werden, sondern das Auge muss die erwähnte *Korrektursakkade* ausführen, welche mehr Zeit in Anspruch nimmt. [25] Unter *Sakkade* versteht man eine sehr schnelle, ruckartige Augenbewegung zum Wechsel des Fixationspunktes. Während dieser Augenbewegung ist das Sehen stark beeinträchtigt [23, S. 235].

Die Zeit, in der die Information verarbeitet wird, nachdem die Situation erkannt wurde wird als *Reaktionsgrundzeit* bezeichnet. Danach beginnt die *Umsetzzeit*. Dabei handelt es sich um die Zeit, die benötigt wird, um den Fuß vom Gaspedal auf das Bremspedal umzusetzen. [24, S. 52]

*Blickzuwendungszeit*, *Reaktionsgrundzeit* und *Umsetzzeit* können als *erweiterte Reaktionszeit* zusammengefasst werden [24, S. 56].

Während der gesamten Reaktionszeit wird noch keine Verzögerung eingeleitet und das Fahrzeug fährt mit unverminderter Geschwindigkeit weiter. Die durchschnittliche Reaktionszeit beträgt 0,8 s, mit erhöhter Bremsbereitschaft 0,5 s [19, S. 101].

Die *Ansprechzeit* wird ebenfalls noch zur Reaktionsphase gezählt. Darunter wird jener Zeitversatz verstanden, der aus technischen Gründen zwischen der Berührung des Bremspedals und dem Ansprechen der Bremse liegt [19, S. 101].

Es können die in Tabelle 2-2 dargestellten Werte für die einzelnen Zeitbereiche der Reaktionsphase angenommen werden.

Tabelle 2-2: Zeitangaben für Teilbereiche der Reaktionsphase[18, S. 126]

Teilbereich der Reaktionsphase	Benötigte Zeit
<b>Reaktionsgrundzeit</b>	0,45s (2%: 0,22s; 98%: 0,58s)
<b>Umsetzzeit</b>	0,19s (2%: 0,15s; 98%: 0,21s)
<b>Ansprechzeit</b>	0,05s (2%: 0,03s; 98%: 0,06s)
<b>Gesamte Reaktionsphase (Summe)</b>	0,69s (2%: 0,40s; 98%: 0,85s)

### Die Schwellphase

Die *Schwellzeit* ist die Zeit die benötigt wird um vom ersten Druckanstieg aus den vollen Bremsdruck zu erreichen. Sie liegt bei üblichen Personenkraftwagen zwischen 0,2 s und 0,45 s und hängt von der Betätigung des Bremspedals ab. Im Normalfall kann eine Schwellzeit von 0,2 s angenommen werden. Erfolgt die Notbremsung jedoch von Geschwindigkeiten über 100 km/h oder handelt es sich um schlechte Witterungszustände, kann die Schwellzeit auch doppelt so hoch, mit 0,4 s angenommen werden. [19, S. 101]

### Die Vollbremsphase

Während der Vollbremsphase ist die maximale Verzögerung erreicht und bleibt näherungsweise konstant. In dieser Phase liefert die Bremse ihre volle Leistung. [18, S. 127]

Die maximal möglichen Verzögerungswerte während der Vollbremsphase hängen unter anderem vom Untergrund ab. Der Untergrund beeinflusst den *Reibungskoeffizienten* zwischen Straße und Reifen und führt so zu unterschiedlichen maximalen Verzögerungswerten.

Auf diese Weise hat der Straßenbelag einen entscheidenden Einfluss auf den *Reibungskoeffizienten*. So liefert eine Asphaltfahrbahn bessere Verzögerungswerte als Kopfsteinpflaster oder Kies. Die maximalen Bremsverzögerungswerte auf unterschiedlichen Untergründen können der Literatur zum Beispiel aus [19, S. 107] entnommen werden.

Neben dem Belag der Straße ist auch der Witterungszustand dafür entscheidend welcher maximale Verzögerungswert erreicht werden kann.

Wird zum Beispiel von einem *Reibungskoeffizienten* von 0,8 für die trockene Fahrbahn ausgegangen, so ist eine maximale Verzögerung von  $7,85 \text{ m/s}^2$  zu erreichen.

In Tabelle 2-3 sind Werte für *Reibungskoeffizienten* und die sich daraus ergebende maximale Verzögerung für ausgewählte Witterungszustände dargestellt.

Tabelle 2-3: Bremsverzögerungswerte in Abhängigkeit der Witterung

Witterungszustand der Fahrbahn	Reibungskoeffizient $\mu$	Maximal mögliche Verzögerung $a_{\max}$
trocken	0,80 [26, S. 435] zit. nach [27]	$0,80 \cdot 9,81 = 7,85 \text{ m/s}^2$
nass	0,45 [26, S. 435] zit. nach [27]	$0,45 \cdot 9,81 = 4,41 \text{ m/s}^2$
schneebedeckt	0,15 [26, S. 435] zit. nach [27]	$0,15 \cdot 9,81 = 1,47 \text{ m/s}^2$
eisig	0,05 [26, S. 435] zit. nach [27]	$0,05 \cdot 9,81 = 0,49 \text{ m/s}^2$

Um einen möglichst kurzen Bremsweg zu erreichen, muss das Bremspedal so schnell und so stark wie möglich durchgedrückt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass der Bremsweg auch vom Körpergewicht und der Beinmuskulatur abhängt, da ein Bein das halbes Körpergewicht tragen muss. Im Allgemeinen kann angenommen werden, dass Männer größer und schwerer als Frauen sind und eine stärker ausgebildete Muskulatur besitzen. So kann erklärt werden, warum Frauen tendenziell geringere Vollbremsverzögerungen erreichen als Männer. [18, S. 106]

Dieser Umstand beeinflusst also neben der Vollbremsphase (Kraft mit der das Bremspedal durchgedrückt wird) auch die Schwellphase (Schnelligkeit mit der das Bremspedal durchgedrückt wird).

### 2.3.5 Fahrerverhalten in kritischen Situationen – Entscheidungsverhalten des Fahrers

#### 2.3.5.1 Ideale Manöverauswahl zur Unfallvermeidung

Grundsätzlich stehen dem Fahrer zwei Möglichkeiten zur Verfügung um eine Kollision mit einem Hindernis zu verhindern. Dabei handelt es sich um Bremsen und Lenken. Mit Bremsmanövern ist es möglich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu verlangsamen, während mit Lenkbewegungen die Fahrtrichtung geändert werden kann.

Welches Manöver die theoretische geeignetste Variante darstellt um einen Unfall zu vermeiden, hängt dabei von der Gefahrensituation ab. Je nach Situation ist eine andere Wegdistanz bis zum Aufprall und eine andere (Relativ-)Geschwindigkeit vorhanden. Für geringe Geschwindigkeiten, ist das Bremsmanöver vorzuziehen. Bei höheren Geschwindigkeiten, verlängert sich der Bremsweg jedoch quadratisch und Ausweichen wird zu einer besseren Alternative um den Unfall zu vermeiden. [28]

## Einleitung

Dies wird in Abbildung 2-16 graphisch dargestellt. Die blauen Linien kennzeichnen den Punkt, bis zu dem eine Kollision durch Bremsen verhindert werden kann (*LPTB – last point to break*). Die roten Linien beschreiben den Punkt, bis zu dem die Kollision durch ein Lenkmanöver verhindert werden kann (*LPTS – last point to steer*). Es lässt sich erkennen, dass bei kleinen Relativgeschwindigkeiten für das Bremsmanöver weniger Weg benötigt wird, als beim Ausweichmanöver. Die strichlierten Linien kennzeichnen einen Fall bei dem der *Reibungskoeffizient*  $\mu$  geringer ist, als im Fall der durchgezogenen Linien. Die punktierte Linie stellt ein Ausweichen mit einem geringer gewählten *Seitenversatz*  $S_v$  dar. [28]

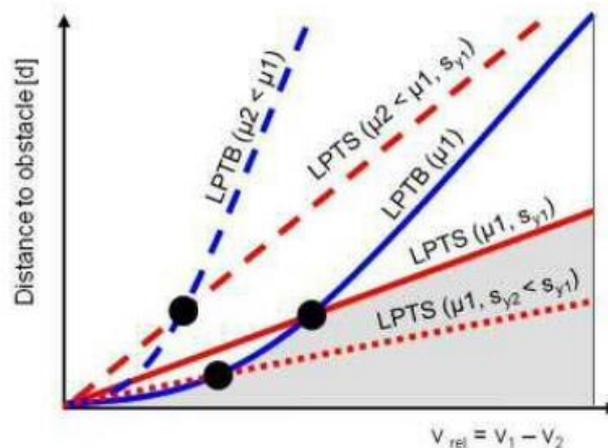


Abbildung 2-16: Unfallvermeidung durch Bremsen und Lenken [28]

### 2.3.5.2 Studien zur tatsächlichen Entscheidungswahl des Fahrers

Zwischen der idealen Manöerauswahl zur Unfallvermeidung und der tatsächlichen Entscheidung des Fahrzeugführers, gibt es jedoch Abweichungen.

Dazu gibt es eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen, die sich mit dem Verhalten des Fahrers in kritischen Fahrsituationen beschäftigen. Einen guten Überblick darüber liefern die Arbeiten von *Adams* [29] und *McGehee* [30].

*Adams* berücksichtigte Studien auf Basis von Realunfällen, Simulatortests und Feldstudien.

Es konnte festgestellt werden, dass allgemein gesehen Fahrer in Notsituationen viel eher dazu tendieren zu Bremsen als zu Lenken. Obwohl festgestellt wurde, dass das optimale Manöver zur Vermeidung des Unfalls viel öfter aus reinem Lenken oder einer Kombination aus Lenken und Bremsen besteht, wird das reine Bremsmanöver vom Menschen bevorzugt.

Dabei konnte bis jetzt noch keine eindeutige Begründung gefunden werden, warum dies der Fall ist. [29]

*Adams* führt jedoch einige Lösungsansätze an, die diesen Umstand zu erklären versuchen. Als mögliche Gründe für die Abneigung des Fahrers gegenüber Lenkmanövern gelten demnach folgende angeführte Umstände [29]:

- Der Fahrer weicht nur sehr ungern von seiner ursprünglich ausgewählten Streckenführung ab und möchte diese so gut wie möglich beibehalten.
- Andere Reaktionsoptionen als Bremsen sind dem Fahrzeuglenker oft zu wenig bewusst und werden deshalb nicht in Betracht gezogen.
- Fahrzeuglenker schätzen das Fahrverhalten ihres Fahrzeuges oft falsch ein und trauen dem Fahrzeug die benötigte Performance für das Lenkmanöver nicht zu.
- Der Fahrer bevorzugt Bremsen, damit durch ein ausgeführtes Ausweichmanöver nicht zusätzlich andere, nicht einschätzbare Kollisionen riskiert werden müssen.

Auch *Lechner* und *Malaterre* [31] haben festgestellt, dass wenn genügend Zeit bis zur Kollision zur Verfügung steht, Bremsen das vorrangig präferierte Manöver darstellt. Je weniger Zeit jedoch bis zu einem Unfall zur Verfügung steht, umso eher werden Fahrer auch ein Ausweichmanöver als Reaktion in Betracht ziehen. [30] zit. nach [31]

Dieser festgestellte Sachverhalt konnte auch in einer Studie der *Continental AG* beobachtet werden [28]. Im Rahmen dieser Unfallvermeidungsstudie mit 41 Teilnehmern auf der hauseigenen Teststrecke in Frankfurt, wurde das Fahrerverhalten in kritischen Fahrsituationen ermittelt.

## Einleitung

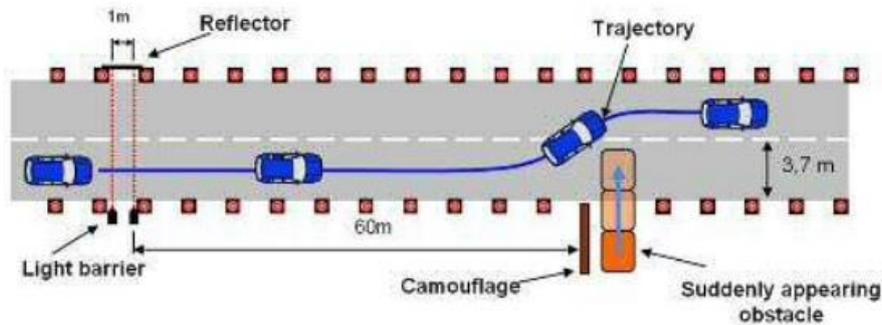


Abbildung 2-17: Versuchsaufbau der Unfallvermeidungsstudie [28]

In Abbildung 2-17 ist der prinzipielle Versuchsaufbau für diese Tests dargestellt. Die Probanden hatten die Aufgabe das Fahrzeug mehrere Runden entlang eines Rundkurses zu führen, um den Erwartungseffekt der Fahrer auf eine Reaktion zu verringern. Nach einigen zurückgelegten Runden, in denen es zu keinen Vorkommnissen kam, wurde ein Hindernis hinter einer Sichtabschattung auf die Fahrbahn befördert. Dabei wurde sowohl der Überdeckungsgrad, als auch die verbleibende Reaktionszeit des Fahrers variiert. Jeder Proband durfte den Versuch nur einmal durchführen, um so den Überraschungseffekt garantieren zu können. [28]

Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abbildung 2-18 dargestellt.

Unter *Time To Collision* – kurz TTC – versteht man jene Zeitspanne, die bis zu einer Kollision vergeht, wenn die betroffenen Verkehrsteilnehmer weder eine Geschwindigkeits- noch eine Richtungsänderung durchführen.

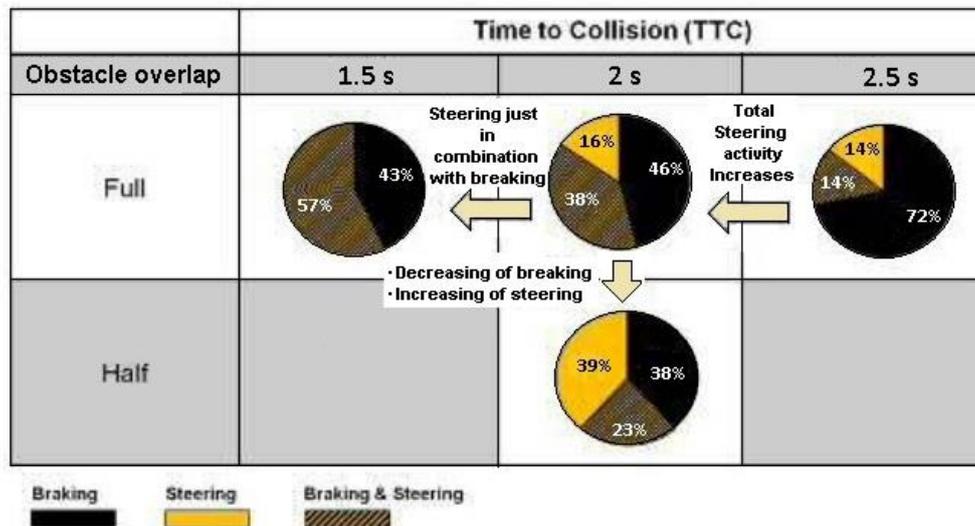


Abbildung 2-18: Daten aus Unfallvermeidungsstudie [28]

Es lässt sich feststellen, dass bei einer relativ großen *Time To Collision* (TTC) von 2.5 s der überwiegende Teil der Fahrer durch Bremsen auf das Verkehrsproblem reagierte. 72% der Fahrer reagierten mit Bremsen, während nur jeweils 14% mit einem Ausweichmanöver bzw. einem kombinierten Manöver aus Bremsen und Lenken reagierten. [28]

Wurde die TTC jedoch verringert, lässt sich feststellen, dass der Anteil der Manöver, die eine Lenkbewegung beinhalten stieg. Bei einer TTC von 2 s machen Manöver mit Lenkbewegungen bereits 54% und somit mehr als die Hälfte aller Manöver aus. Dazu zählen sowohl reine Lenkmanöver (16%) als auch eine Kombination aus Lenk- und Bremsmanöver (38%). [28]

Wird die TTC nochmals um eine halbe Sekunde auf 1,5 s reduziert, lässt sich erkennen, dass es zwar keine reinen Lenkmanöver mehr gibt. Die Anzahl der kombinierten Manöver stieg jedoch auf 57%, während die reinen Bremsmanöver nur mehr 43% aller Reaktionsmanöver ausmachten. [28]

Weiters lässt sich in Abbildung 2-18 der Einfluss der Überdeckung auf das Ausweichverhalten der Fahrer darstellen. Man kann erkennen, dass mit geringerer Überdeckung der Anteil an Ausweichmanöver zunimmt. Während bei einer TTC von 2 s und voller Überdeckung noch 46% aller Fahrer mit einem reinen Bremsmanöver reagierten, verringerte sich dieser Wert bei halber Überdeckung um 8% auf 38%. Das bedeutet, dass bei einer geringeren Überdeckung Manöver mit Lenkbeteiligung zunahm. Es kann jedoch festgestellt werden,

## Einleitung

dass die Zunahme vor allem auf einem großen Anstieg bei reinen Lenkmanövern beruht, während sich die Kombination von Lenken und Bremsen sogar verringerte. Das angewendete reine Lenkmanöver stieg von 16% auf 39%. Das Kombinationsmanöver verringerte sich von 38% auf 23%. [28]

Intuitiv empfanden also mehr Fahrer durch den geringeren Überdeckungsgrad, ein Ausweichen durch eine Lenkbewegung zielführender als eine Vollbremsung.

## 3. METHODE

### 3.1 Das Fahrermodell allgemein

Die Kernaufgabe dieser Diplomarbeit besteht darin, ein Fahrermodell zu entwickeln, um das menschliche Fahrverhalten in unterschiedlichen Verkehrssituationen zu simulieren.

Dazu sollen bestimmte Randbedingungen erfüllt werden. Die geforderten Voraussetzungen für das Modell lauten wie folgt:

- a) Das Hauptziel des Fahrermodells soll in der Simulation eines erforderlichen Fahrerreaktionsverhaltens liegen, welches durch einen anderen Verkehrsteilnehmer oder einem Hindernis ausgelöst wird, um eine bevorstehende Kollision nach Möglichkeit zu verhindern. Andere Einflüsse auf das Fahrverhalten, die zum Beispiel durch Ablenkung ausgelöst werden, sollen nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen unter anderem Telefonieren am Steuer oder Bedienen des Radios.
- b) Das Fahrermodell soll möglichst wenige Parameter für eine erfolgreiche Simulation benötigen, aber nach Möglichkeit trotzdem gute Resultate liefern. Diese Forderung ist notwendig, da mit dem erstellten Fahrermodell auch Realunfälle erfolgreich simuliert werden sollen, von denen Informationen oft nicht bis ins letzte Detail vorliegen. Das komplexeste Fahrermodell hat keinen Sinn, wenn es nicht ausgeführt werden kann, weil die erforderlichen Parameter nicht bekannt sind.
- c) Die für die Ausführung des Modells benötigten Parameterwerte, sollen bereits in der Literatur vorhanden sein und für die Anwendung im Modell eingesetzt werden können. Diese Randbedingung soll vermeiden, dass erst aufwendige Versuche durchgeführt werden müssen, um die für das Modell benötigten Parameterwerte zu bestimmen.

## Methode

- d) Wird mittels des erstellten Fahrermodells ein Ausweichmanöver simuliert, so soll dieses so ausgeführt werden, dass bei erfolgreicher Unfallvermeidung eine Weiterfahrt möglich ist. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug nach Durchführung dieses Ausweichmanövers, so orientiert sein soll, dass es in die ursprüngliche Fahrtrichtung ausgerichtet ist. So kann ermöglicht werden, dass die Simulation nach erfolgreicher Absolvierung der Gefahrensituation weiter läuft und nachfolgende Verkehrssituationen simuliert werden können.
- e) Für die Implementierung des Entscheiders in das Fahrermodell, soll auf statistische Daten aus der Literatur zurückgegriffen werden, um so eine fundierte Basis für die Entscheidungswahl zu ermöglichen.

Nach Berücksichtigung dieser Bedingungen wurde festgestellt, dass *regelungstechnische Modelle* das Anforderungsprofil am besten erfüllen.

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist es mit *kognitiven* und *behavioristischen Modellen* zwar genauer möglich, das menschliche Verhalten nachzuahmen. Sie haben aber die großen Nachteile, dass sie sehr komplex sind, viele Input-Parameter erfordern und im Falle der *behavioristischen Modelle* zusätzlich noch hochqualifizierte Spezialisten für die Anwendung benötigen. Zusätzlich werden oft sehr spezielle Parameter benötigt, die aus der Literatur teilweise nicht erhältlich sind. Somit können Forderung b) und c) mit *kognitiven* und *behavioristischen Modellen* nicht, oder nur sehr schwer erfüllt werden.

Aus diesem Grund wurde für die Querführung (Ausweichmanöver) die Auswahl eines Basismodells auf ein *regelungstechnisches Modell* gelegt. Unter der zusätzlichen Annahme, dass in Längsrichtung nur ein Vollbremsmanöver durchgeführt werden soll, ist es nicht notwendig für die Längsrichtung ein Fahrermodell aus der Literatur zu berücksichtigen.

In Abbildung 3-1 ist der prinzipielle Aufbau des mit Matlab programmierten Fahrermodells dargestellt. Ein großer Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass das Modell modular aufgebaut ist. Das bedeutet, dass einzelne Reaktionsmodelle oder das Entscheidungsmodul bei Bedarf einfach ausgetauscht und ersetzt werden können.

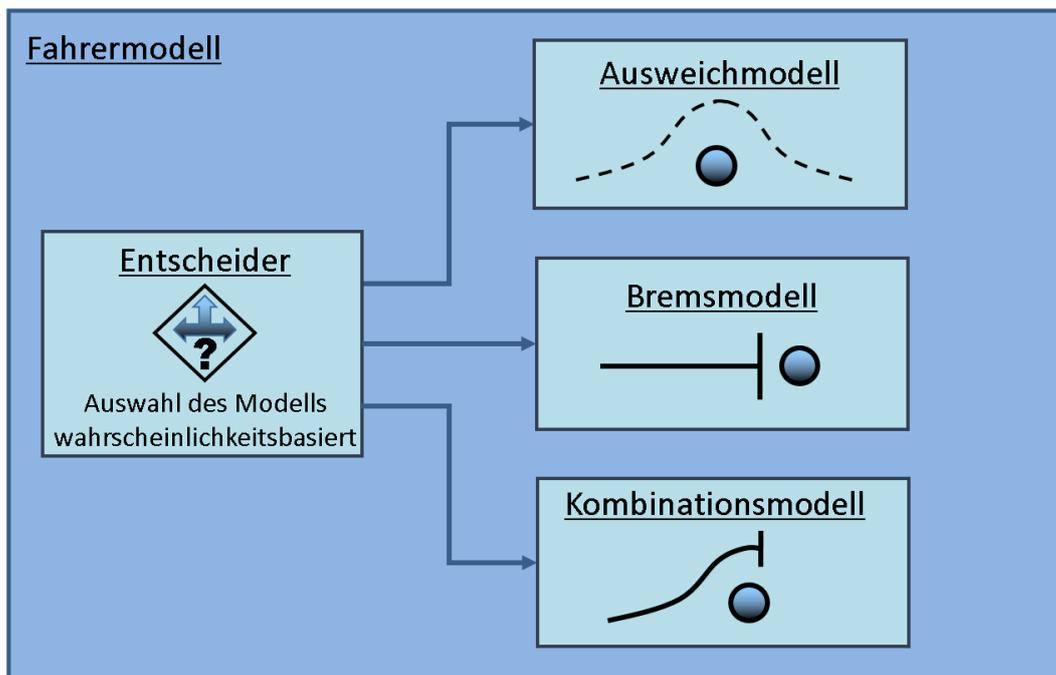


Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau des Fahrermodells

Es lässt sich erkennen, dass das Fahrermodell aus einem Ausweichmodell und einem Bremsmodell besteht. Zusätzlich ist ein Kombinationsmodell, das aus Ausweich- und Bremsmodell zusammengesetzt ist integriert. Allen diesen Modellen ist ein Entscheider vorgelagert. Bei Erkennen eines Hindernisses soll dieser festlegen, welches Teilmodell ausgeführt und welche Reaktion somit getroffen wird.

Aus den am Beginn des Fahrermodells festgelegten und geladenen Informationen, wird die *Kollisionszeit*  $t_c$  berechnet. Sie entspricht der Zeit, die bis zum Zusammenstoß vergeht, sofern keine Reaktionsmaßnahme getroffen wird (engl. *Time To Collision* - *TTC*).

Abgeglichen mit einer vorgegebenen *TTC*, ab der eine Handlung erfolgen soll, bildet sie den Auslösezeitpunkt. Die Auslösung erfolgt dann, wenn die berechnete *Kollisionszeit*  $t_c$ , die für jeden *Simulationszeitschritt*  $\Delta t$  angepasst wird, die vorgegebene *TTC* erreicht oder unterschreitet. Diese Art der Auslösung wird für alle Teilmodelle (Ausweich-, Brems- und Kombinationsmodell) angewendet. Die Bedingung dafür ist in Formel (2-1) dargestellt.

$$t_c \leq TTC \quad (3-1)$$

*Regelungstechnische Fahrermodelle* können die Fahraktivität nur in einem begrenzten Bereich wiedergeben und wirken deshalb oft „künstlich“ [8, S. 231] zit. nach [9]. Das führt unter anderem dazu, dass Vereinfachungen für das Modell notwendig sind.

So werden für dieses Modell folgende Annahmen getroffen:

- Das Modell wird entlang eines geraden Straßenabschnitts angewendet.
- Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird bei der Ausführung des reinen Ausweichmanövers konstant gehalten.
- Das Ausweichmanöver lässt sich nur nach links ausführen.
- Während des reinen Bremsmanövers wird keine Lenkbewegung berücksichtigt.
- Im Kombinationsmodell wird die Ausweichtrajektorie gleich wie beim Ausweichmanöver nur auf Basis der Anfangsgeschwindigkeit berechnet. Die mit der Geschwindigkeitsänderung durch den eingeleiteten Bremsvorgang verbundene Änderung der Trajektorie wird nicht berücksichtigt.

## 3.2 Das Ausweichmodell

Für die Simulation des Ausweichmanövers ist die Implementierung eines Ausweichmodells im Fahrermodell notwendig.

Dem in diesem Simulationsmodell verwendeten Ausweichmodell, liegt das Lenkmodell nach *Renski* zu Grunde. Dieses Modell und dessen Anwendung im Fahrermodell wird in Kapitel 3.2.2 näher dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 in Abbildung 2-14 dargestellt, ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Querschleunigung bei Ausweichmanövern relativ gering. Deshalb wird im hier entwickelten Fahrermodell einheitlich von einer Querschleunigung mit  $2 \text{ m/s}^2$  ausgegangen.

### 3.2.1 Die Ausweichtrajektorie

Damit ein Ausweichmanöver durchgeführt werden kann, muss eine Ausweichtrajektorie, der das Fahrzeug folgen soll bestimmt werden. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass es sich um ein gerades Straßenstück handelt und die Geschwindigkeit während des Ausweichvorganges konstant bleibt.

Die angewendete Ausweichtrajektorie beruht auf den in Kapitel 2.3.3 dargestellten Grundlagen.

Prinzipiell muss im Modell zwischen zwei unterschiedlichen Ausweichtrajektorien unterschieden werden. So gibt es zum einen, die *ideale berechnete Ausweichtrajektorie*, die den anzustrebenden Ausweichverlauf darstellt. Zum anderen entsteht durch die ausgeführten Lenkbewegungen die *tatsächliche ausgeführte Ausweichtrajektorie*. Im Idealfall überlagern sich beide Trajektorien und bilden den exakt gleichen Verlauf. Tatsächlich weichen die Kurven, je nach Güte der Parameteranpassung mehr oder weniger stark voneinander ab.

### 3.2.2 Das Lenkmodell

Beruhend auf den in Kapitel 3.1 festgestellten Überlegungen, wurde als Basis für das in dieser Diplomarbeit erstellte Fahrermodell, mit dem Lenkmodell nach *Renski*, ein *regelungstechnisches Modell* ausgewählt. Das Lenkmodell liefert den für jeden Zeitschritt benötigten Lenkradwinkel  $\delta_1$ , um ein Ausweichmanöver durchführen zu können und wird in diesem Kapitel genauer erklärt. Die prinzipielle Umsetzung ist in Abbildung 3-2 graphisch dargestellt.

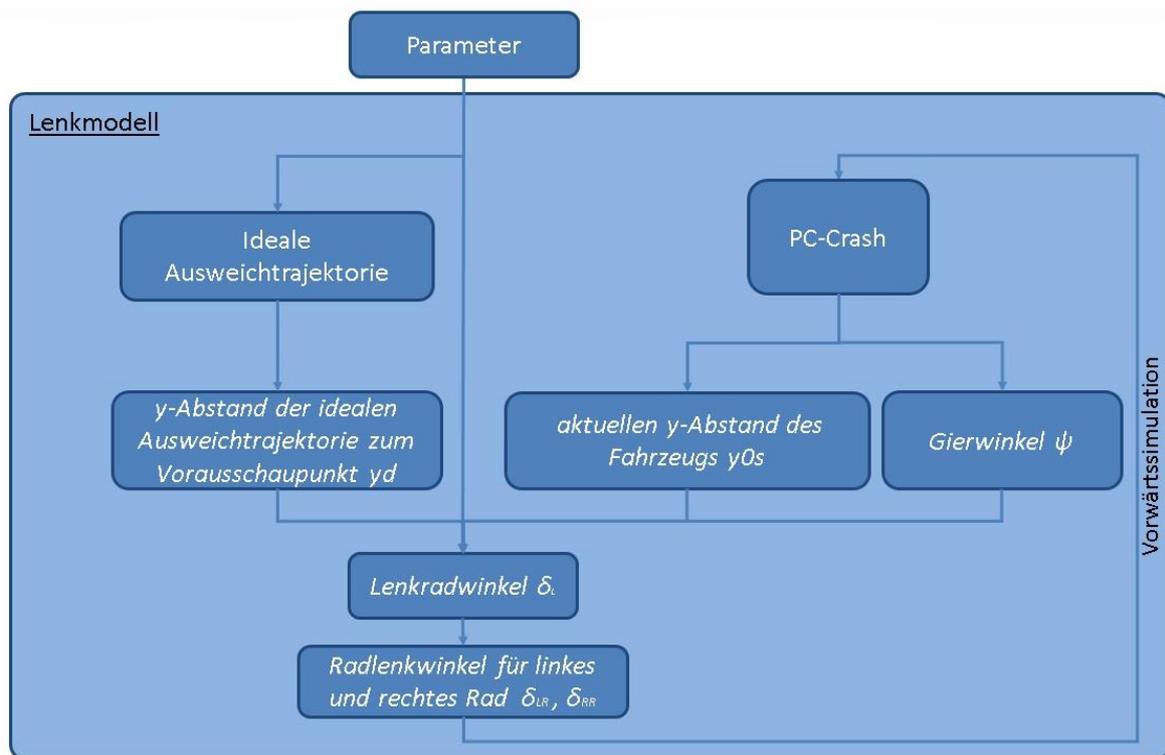


Abbildung 3-2 Aufbau des Lenkmodells

Für die Ausführung des Modells werden zuerst die benötigten Parameterwerte ins Modell geladen. Diese Parameter werden in Kapitel 3.6 näher erläutert.

Daraus kann in weiterer Folge die benötigte, *ideale Ausweichtrajektorie* berechnet werden, woraus der für jeden Simulationszeitschritt benötigte *y-Abstand*  $y_d$  erhalten wird (siehe Kapitel 3.2.1).

Weiters werden die Parameterwerte benötigt, um den nötigen *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  mit Hilfe von Formel (2-1) berechnen zu können (der im Modell benannte *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  entspricht dem im Paper von Renski mit  $\delta_1$  bezeichneten *Lenkradwinkel*). Dafür ist zusätzlich noch der *momentane y-Abstand des Fahrzeugs von der y-Achse*  $y_{0s}$  und der aktuelle *Gierwinkel*  $\psi$  des Fahrzeugs notwendig. Diese beiden Werte werden mit Hilfe des Objektsystems OLE (*object linking embedded*) aus der Unfallrekonstruktionssoftware PC-Crash importiert.

Der regelungstechnische Ansatz des Modells fordert, wie in Abbildung 2-3 dargestellt eine *Rückkopplung*, damit die Stellgrößen angepasst und so nachgeregelt werden können. Deshalb ist es notwendig, dass die aus PC-Crash mittels OLE übertragenen benötigten

Informationen für den *Gierwinkel*  $\psi$  und den *y-Abstand des Fahrzeugs von der y-Achse*  $y_{0s}$  immer zu Beginn eines Simulationsschrittes abgerufen werden.

Somit ist es möglich in einem Vorwärtssimulationsschritt, die neuen aktuell benötigten Werte für den *Gierwinkel*  $\psi$  und den *y-Abstand des Fahrzeugs von der y-Achse*  $y_{0s}$  zu berechnen. Mit Hilfe dieser Werte kann dann wieder der neue, für den aktuellen Simulationsschritt nötige *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  berechnet werden. Auf diese Weise, lässt sich für jeden *Zeitschritt*  $\Delta t$  der benötigte Lenkwinkel bestimmen.

Aus dem so erhaltenen *Lenkradwinkel*  $\delta_L$ , lassen sich über die Ackermannbeziehung die beiden *Radlenkwinkel für das linke*  $\delta_{LR}$  und *rechte Vorderrad*  $\delta_{RR}$  berechnen.

Dazu sind Informationen über die Lenkübersetzung des betrachteten Fahrzeuges notwendig. Da in PC-Crash standardmäßig mit einer *Lenkübersetzung*  $i_s$  von 15 gerechnet wird, wird dieser Wert auch im Lenkmodell verwendet. Tatsächlich haben unterschiedliche Pkws jedoch unterschiedliche Lenkübersetzungen. Die Übersetzungswerte dafür bewegen sich bei aktuellen Personenkraftwagen zwischen 14 und 20 [32, S. 472] und können im Modell bei Bedarf angepasst werden. Während sich die untere Grenze durch die Direktheit der Lenkung ergibt, was vor allem bei hohen Geschwindigkeiten problematisch werden kann, ergibt sich die obere Grenze aus Praktikabilitätsgründen beim Einparken und Reversieren [32, S. 471]. Im Modell können nur konstante Lenkübersetzungen berücksichtigt werden.

Die Umrechnung vom simulierten *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  auf den *kurvenäußeren Radlenkwinkel*  $\delta_A$  folgt nach Formel (3-2) mit Hilfe der *Lenkübersetzung*  $i_s$ .

$$\delta_A = \frac{\delta_L}{i_s} \quad (3-2)$$

Für die Umrechnung auf den *kurveninneren Radlenkwinkel*  $\delta_I$ , wir die Ackermann-Bedingung benötigt. Sie ist in Formel (3-3) angegeben. Zur Berechnung sind Informationen der Fahrzeuggeometrie, wie *Spurweite*  $b_p$  und *Radstand*  $l_R$  des Fahrzeugs notwendig.

Methode

$$\cot \delta_I = \cot \delta_A - \frac{b_p}{l_R} \quad (3-3)$$

Formt man die Ackermannbedingung aus Formel (3-3) auf den Radlenkwinkel für das kurveninnere Rad  $\delta_I$  um, ergibt sich Formel (3-4).

$$\delta_I = \arctan \frac{\tan \delta_A}{1 - \frac{b_p}{l_R} * \tan \delta_A} \quad (3-4)$$

Somit lassen sich aus Formel (3-2) und Formel (3-4) bei gegebenem *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  die Radlenkwinkel für das kurveninnere und kurvenäußere Rad berechnen. Diese Werte können in weiterer Folge an PC-Crash zurückgegeben werden.

Die im Modell verwendete *ideale Ausweichtrajektorie* orientiert sich an Formel (2-8), muss jedoch an das Lenkmodell angepasst werden. Dazu wird sie um die *Vorausschauzeit*  $La/v$  versetzt.

$$y = Sv * \left( \frac{x}{L} - \frac{1}{2\pi} * \sin \frac{2\pi * x}{L} \right) \quad (2-8)$$

Im ersten Schritt wird Formel (2-8) zeitabhängig gemacht. Daraus ergibt sich Formel (3-5).

$$y = Sv * v * \left( \frac{t}{L} - \frac{1}{2\pi} * \sin \frac{2\pi * t}{L} \right) \quad (3-5)$$

Diese Formel wird dann um die *Vorausschauzeit*  $La/v$  versetzt und es ergibt sich Formel (3-6).

$$y = Sv * v * \left( \frac{(t - \frac{La}{v})}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2 * \pi * v * (t - \frac{La}{v})}{L} \right) \quad (3-6)$$

Auf diese Weise kann garantiert werden, dass der im ersten Simulationsschritt geforderte, geltende Wert des *Gierwinkels*  $\psi$  mit  $\psi=0$  auch tatsächlich mit dem aus PC-Crash übertragenen Wert übereinstimmt. Dies ist graphisch in Abbildung 3-3 dargestellt.

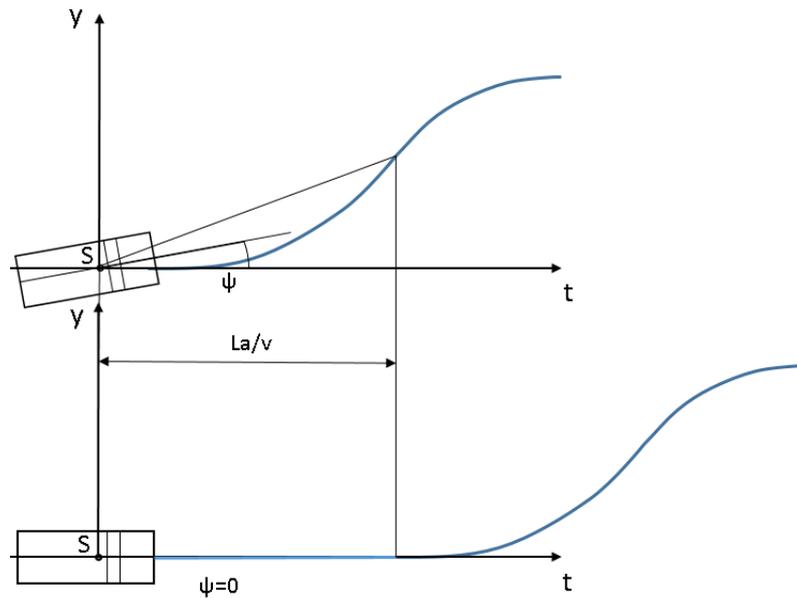


Abbildung 3-3: Berücksichtigung der Vorausschauzeit  $L_a$  für die Ausweichtrajektorie

Formel (3-6) kann so im Lenkmodell zur Erstellung der *idealen Ausweichtrajektorie* angewendet werden. Damit kann in weiterer Folge der *y-Abstand der idealen Ausweichtrajektorie*  $y_d$  zum *Vorausschaupunkt* für jeden Simulationsschritt berechnet werden.

### 3.2.3 Integration des Lenkmodells im Ausweichmodell

Das Lenkmodell selbst, beschreibt rein das Lenkverhalten einer fahrzeugführenden Person in Bezug auf eine vorausliegende Kursänderung. Alleine reicht es nicht aus, um ein von Mensch durchgeführtes Ausweichmanöver simulieren zu können. Dazu sind noch weitere Verhaltensweisen des Menschen zu berücksichtigen.

Entscheidet sich der Fahrer dazu ein Lenkmanöver einzuleiten, so vergeht erst eine bestimmte *Lenkreaktionszeit*  $T_k$ , bis mit dem Lenkmanöver begonnen wird.

*Powelleit* führte unterschiedliche Studien zu Reaktionszeiten durch. Dabei lagen die Werte für gemessenen Lenkreaktionszeiten je nach örtlichen Gegebenheiten zwischen 572 und 952 ms [21, S. 50].

## Methode

Im in dieser Diplomarbeit vorgestellten Fahrermodell, wird gemäß Tabelle 2-2 von einer Bremsreaktionszeit von 690 ms ausgegangen. Diese Bremsreaktionszeit entspricht im Paper von *Powelleit*, dem innerstädtischen Anwendungsfall. Aus diesem Grund, wird auch für den Lenkreaktionswert der innerstädtische Anwendungsfall angewendet. Daraus ergibt sich ein Wert von 572 ms.

Diese Festlegung erfüllt zusätzlich die Tatsache, dass die Lenkreaktion unter normalen Umständen geringer als die Bremsreaktion andauert [19, S. 110].

Für Anwendungsfälle im außerstädtischen Bereich oder auf Autobahnen gelten nach *Powelleit* [21] andere Lenkreaktionswerte. Sie sind bei Bedarf der angegebenen Literatur zu entnehmen.

Wird das Ausweichmanöver ausgewählt, so wird also im ersten Schritt die *Lenkreaktionszeit*  $T_k$  simuliert, die vergeht bis das Lenkmanöver eingeleitet werden kann. Erst nach Ablauf dieser Zeitspanne, wird das Lenkmodell ausgelöst und der eigentliche Ausweichvorgang kann gestartet werden. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

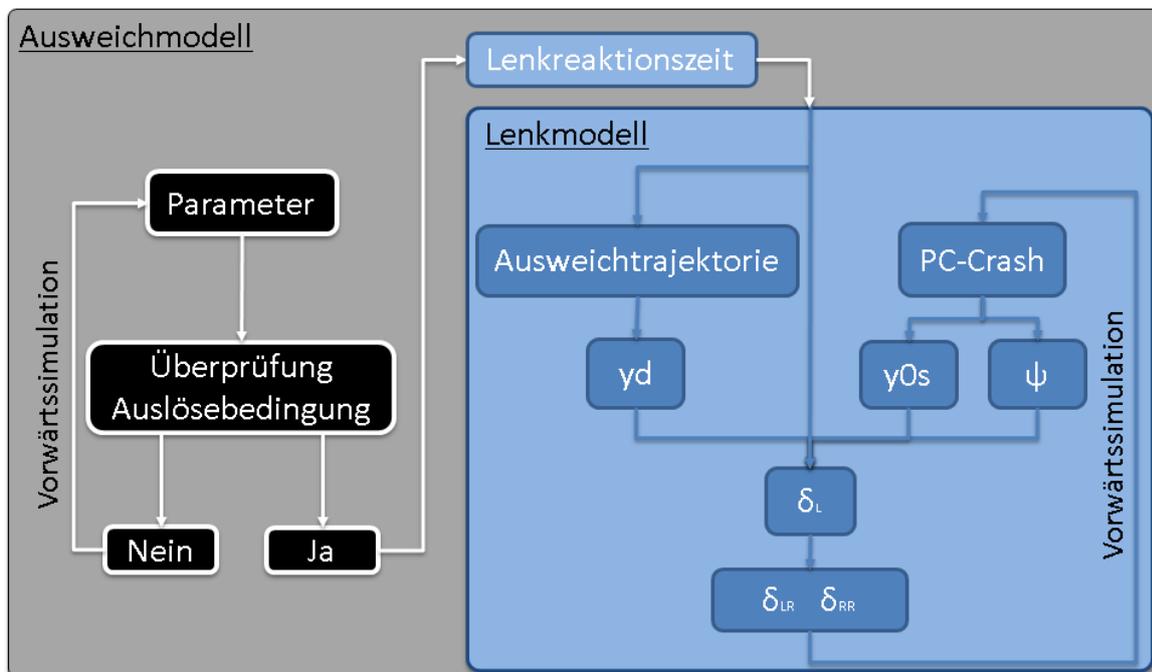


Abbildung 3-4: Aufbau des Ausweichmodells

Die Auslösung des Ausweichmodells erfolgt gleich wie bei den anderen Teilmodellen, nachdem die Auslösebedingung erfüllt wird. Dies wurde im Detail in Kapitel 3.1 beschrieben.

### 3.3 Das Bremsmodell

In Abbildung 3-5 ist der prinzipielle Aufbau des Bremsmodells dargestellt. Ebenso wie das Ausweichmodell, wird auch das Bremsmodell nach Erfüllung der Auslösebedingung gestartet. Danach werden die einzelnen bereits im Theorieteil in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Phasen, während eines Vollbremsvorgangs simuliert.

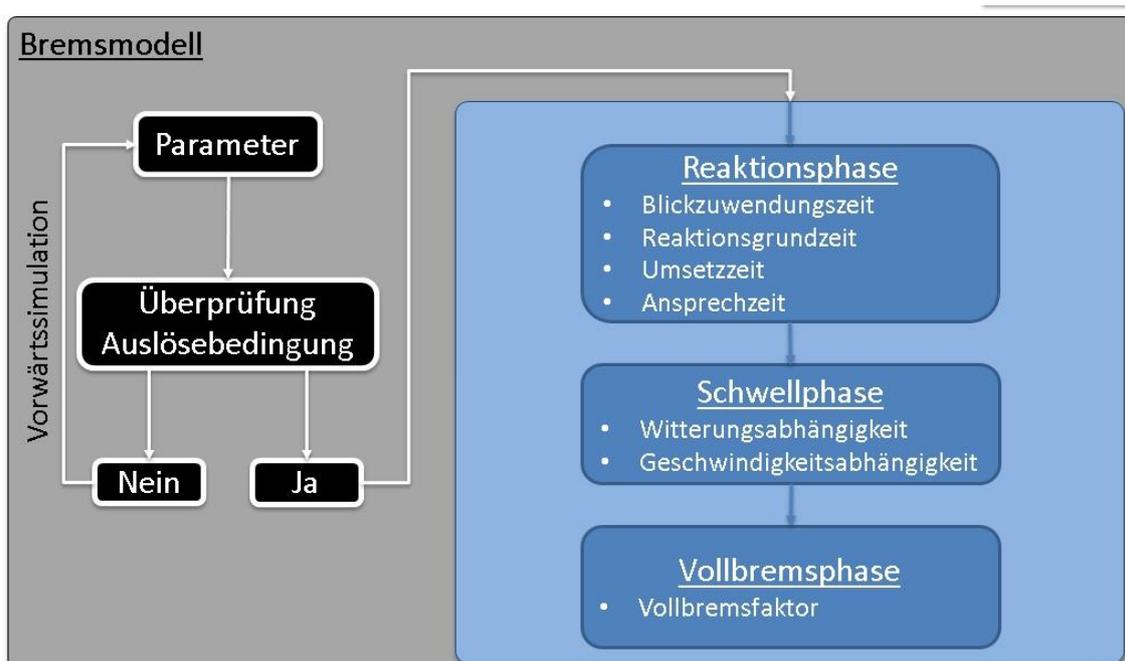


Abbildung 3-5: Aufbau des Bremsmodells

Im Bremsmodell wird in der Reaktionsphase die *Blickzuwendungszeit*, die *Reaktionsgrundzeit*, die *Umsetzzeit* und die *Ansprechzeit* berücksichtigt. Die Reaktionszeit hängt davon ab, ob sich ein Objekt im direkten Blickfeld befindet oder nicht, was mittels vorgegebener Auswahl berücksichtigt wird.

Die Schwellphase wird wie in der Literatur üblich unter normalen Umständen mit einer Dauer von 0,2 s angenommen. Im Modell können jedoch die Witterungsbedingungen und die Geschwindigkeit geprüft und berücksichtigt werden. Liegen ungünstige Witterungsverhältnisse oder eine Fahrzeuggeschwindigkeit über 100 km/h vor, so wird die Schwellzeit gemäß Kapitel 2.3.4 von 0,2 s auf 0,4 s verlängert. Ungünstige

## Methode

Witterungsverhältnisse werden dabei über die Abfrage des Reibungskoeffizienten zwischen Fahrbahn und Reifen berücksichtigt.

Für das Bremsmodell werden zusätzlich noch einige Vereinfachungen angenommen.

So kann die Vollbremsphase idealisiert als konstante Bremsverzögerung angenommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass während der gesamten Phase das Bremspedal bis zum Stillstand des Fahrzeuges komplett durchgedrückt wird.

Zusätzlich wird in PC-Crash die Bremschwellzeit standardmäßig als konstanter Wert mit der Größe der halben Vollbremsverzögerung angenommen. Dies wird auch im verwendeten Bremsmodell dieser Arbeit angenommen.

Aus diesen Vereinfachungen, ergibt sich der in Abbildung 3-6 dargestellte Simulationsverlauf der Verzögerung über die Zeit bzw. der Bremsphase.

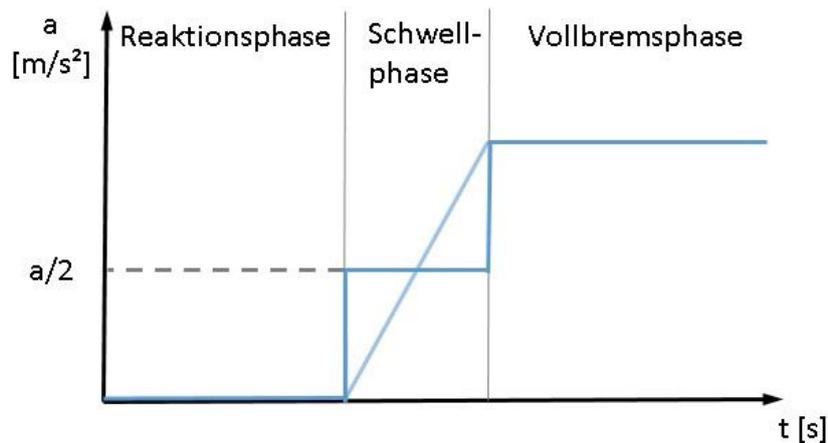


Abbildung 3-6: Verzögerungsverlauf während Bremsmanöver

Als Standardreaktionszeit können  $0,8$  s angenommen werden. Die Standardschwellzeit beträgt bei PKWs zwischen  $0,2$  und  $0,45$  s.

Die Vollbremsphase wird mit der maximal möglichen Verzögerung realisiert. Um Fälle berücksichtigen zu können, in denen das Bremspedal möglicherweise nicht ganz durchgedrückt und somit nicht die volle, realisierbare Verzögerung erzielt wurde, wurde ein

Vollbremsfaktor  $f$  eingeführt. Dieser Faktor wird mit der maximal möglichen Verzögerung multipliziert und ist in Formel (3-7) dargestellt.

$$a_{BR} = a_B * f \tag{3-7}$$

### 3.4 Das Kombinationsmodell

In der Realität besteht ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Reaktionen zur Vermeidung eines Unfalls aus einer Kombination aus Lenk- und Bremsmanöver. Deshalb sollen diese Manöver auch im Modell berücksichtigt werden.

Dazu werden die bereits zuvor erklärten Ansätze für das Ausweichmodell und das Bremsmodell kombiniert und gemeinsam angewendet. Dies ist in Abbildung 3-7 schematisch dargestellt.

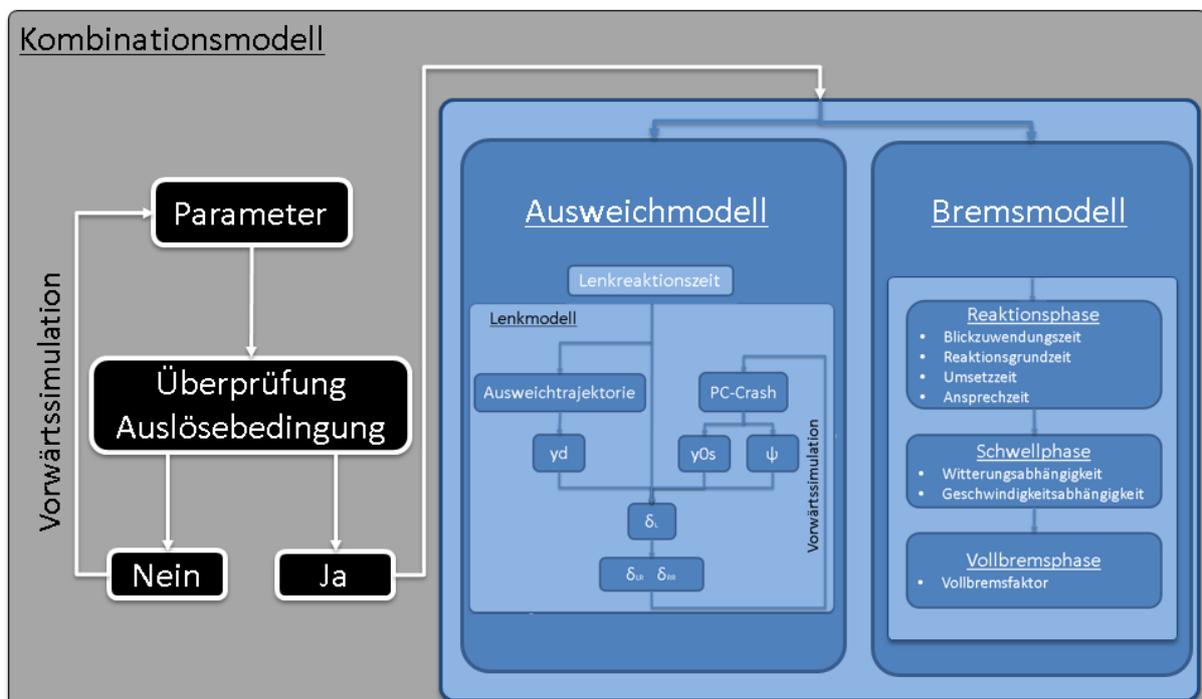


Abbildung 3-7: Aufbau des Kombinationsmodells

Beide Manöver werden zeitgleich ausgelöst. Sowohl das Ausweichmodell als auch das Bremsmodell laufen dann getrennt voneinander – wie in Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3

## Methode

beschrieben – ab und beeinflussen einander nicht. Für die Berechnung der Ausweichtrajektorie für das Ausweichmodell wird nur die Anfangsgeschwindigkeit berücksichtigt. Die Auswirkungen der Geschwindigkeitsreduktion durch das Bremsmodell auf die Ausweichtrajektorie werden nicht berücksichtigt.

Da die Reaktionsphase des Lenkmanövers kürzer ist, als die des Bremsmanövers, beginnt der Ausweichvorgang bevor die Bremsverzögerung eingeleitet wird. Dies liegt unter anderem daran, dass für die Lenkbewegung keine Fußumsetzzeit oder Schwellzeit berücksichtigt werden muss. Zusätzlich wird die Lenkreaktion schneller eingeleitet, da die Reizlänge vom Kopf zu den Armen kürzer als zu den Beinen ist [19, S. 110].

### 3.5 Der Entscheider

Mit Hilfe des Entscheiders soll simuliert werden, wie der Fahrer auf die festgestellte Gefahrensituation reagiert. Allgemein ist die Reaktion dabei von vielen Faktoren abhängig, die nicht alle berücksichtigt werden können, da dies den Umfang des Programms sprengen würde. Deshalb wurden wie anfangs erwähnt auch einige Einschränkungen im Bezug auf die Entscheidungswahl getroffen, die erfüllt werden sollen.

So sollen die Grundlagen für die Entscheidung welches Manöver ausgeführt wird, auf statistischen Daten aus der Literatur beruhen. Des Weiteren sollen nur Verkehrssituationen berücksichtigt werden, in denen ein anderer Verkehrsteilnehmer oder Hindernis eine handelnde Reaktion des Fahrers erforderlich macht. Auch diese Prämisse beeinflusst die Entscheidungswahl, da die Entscheidung welches Manöver ausgewählt werden soll auch von der Verkehrssituation abhängig ist. Eine gegebenenfalls benötigte Zeitspanne für die Entscheidungswahl soll nicht berücksichtigt werden.

Wie bereits in Kapitel 2.3.5 erwähnt, gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Studien, die sich mit dem Reaktionsverhalten des Fahrers in unterschiedlichen Gefahrensituationen beschäftigen. In dieser Arbeit wird auf die Studie der *Continental AG*, die bereits auf Seite 30ff näher beschrieben wurde, zurückgegriffen.

Die Ergebnisse dieser Studie sollen die Grundlage für den im Modell verwendeten Entscheider bilden.

Da diese Studie nur für drei TTC-Werte vorliegt, werden die restlichen Zeitschritte je nach Größenordnung den bekannten Werten zugeordnet, nachdem eine Interpolation ebenfalls als ungenau angenommen werden muss.

So wird festgelegt, dass bei einem TTC-Wert kleiner gleich 1,75 s, die Ergebnisse für den Fall von 1,5s verwendet werden sollen. Für einen TTC-Wert zwischen 1,75 s und 2,25 s soll das Ergebnis für 2 s verwendet werden. Zeitbereiche ab 2,25 s, sollen mit dem Resultat für 2,5 s abgebildet werden. Diese Annahmen sind in Tabelle 3-1 nochmals zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-1: Gültigkeitsbereiche für auftretende TTC-Werte

TTC-Werte	Dazugehöriger Gültigkeitsbereich
<b>TTC = 1,5s</b>	$TTC \leq 1,75s$
<b>TTC = 2s</b>	$1,75s < TTC < 2,25s$
<b>TTC = 2,5s</b>	$TTC \geq 2,25s$

Zusätzlich kann wie in Abbildung 2-18 dargestellt prinzipiell auch die Überdeckung für die Entscheidungswahl berücksichtigt werden. Da hierzu aber aus der berücksichtigten Studie [28] nur wenige Informationen vorliegen, wird standardmäßig vom Fall der vollen Überdeckung ausgegangen. Nur bei einem TTC-Wert zwischen 1,75 s und 2,25 s wird die Entscheidungswahrscheinlichkeit gemäß Abbildung 2-18 angepasst, sofern eine halbe Überdeckung vorliegt. Dabei wird die Auswahl so getroffen, dass ab einer Überdeckung größer als 0,5 die Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine volle Überdeckung gewählt wird. Während bei einer Überdeckung kleiner oder gleich 0,5 die Entscheidungswahrscheinlichkeiten für die halbe Überdeckung berücksichtigt wird.

Obwohl sich wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, Tendenzen erkennen lassen, wie sich Fahrer in Unfallsituationen verhalten, ist es sehr schwierig geeignete Wahrscheinlichkeitswerte für den Entscheider auszuführen, da die Entscheidungswahl des Menschen trotzdem durch äußere Einflüsse von Situation zu Situation unterschiedlich ausfallen kann [29]. Aus diesem

## Methode

Grund ist die in diesem Modell implementierte Entscheidungswahl nur als grobe Annäherung zu sehen und erfordert im Sinne einer größeren Simulationsgenauigkeit noch zukünftige Verbesserungen.

Die in diesem Fahrermodell verwendete Entscheidungsverteilung gilt also vor allem für das unerwartete Erscheinen von Hindernissen, die plötzlich von der rechten Straßenseite möglichst quer zur Fahrbahn auftauchen. Es ist anzunehmen, dass in anderen sich ergebenden Gefahrensituationen, die menschliche Entscheidungswahl, je nach Art der Situation mehr oder weniger stark von der hier angeführten Entscheidungsverteilung abweicht.

### 3.6 Die Parameter des Fahrermodells

Jedes Teilmodell benötigt eine gewisse Anzahl an Information, um erfolgreich ausgeführt werden zu können. Auf Grund dieser Tatsache ergeben sich die im Folgenden beschriebenen erforderlichen Parameter.

Grundsätzlich kann im Modell zwischen *vorzugebenden* und *anzupassenden Parametern* unterschieden werden.

Unter *vorzugebende Parameter*, werden in diesem Modell jene Parameter verstanden, die fix vorgegeben sind und im Modell direkt angewendet werden können. Dazu zählt zum Beispiel der Reibungskoeffizient zwischen Straße und Reifen.

*Anzupassende Parameter*, sind jene Parameter, die in Abhängigkeit anderer Parameter abgestimmt werden müssen, bevor sie im Modell angewendet werden können.

Insgesamt werden für eine erfolgreiche Durchführung des Fahrermodells 12 Parameter benötigt. Diese Parameter sind folgend in Tabelle 3-2 aufgelistet.

Tabelle 3-2: Parameter des Fahrermodells

Vorzugebende Parameter		
<b>v1</b>	Geschwindigkeit Egofahrzeug	[m/s]
<b><math>\mu</math></b>	Reibungskoeffizient Straße-Reifen	[-]
<b>f</b>	Vollbremsfaktor	[-]
<b>iS</b>	Lenkübersetzung	[-]
<b>Sv</b>	Zieloffset (Ausweichversatz)	[m]
<b>tRD</b>	Reaktionsdauer ( beinhaltet Reaktionsgrundzeit, Umsetzzeit, Ansprechzeit)	[s]
<b>Tk</b>	Lenkreaktionszeit	[s]
<b>TTC</b>	„Time To Collision“-Reaktionspunkt	[s]
<b>v2</b>	Geschwindigkeit des Hindernisses	[m/s]
Anzupassende Parameter		
<b>La</b>	Vorausschaudistanz	[m]
<b>W</b>	Lenkwinkelverstärkung	[-]
Einstellungswert		
<b>Blickabwendung</b>	1 – Gefahrenobjekt außerhalb Blickfeld 0 – Gefahrenobjekt im Blickfeld	[-]

Bei den ersten 8 Parametern, die in Tabelle 3-2 dargestellt sind, handelt es sich um *vorzugebende Parameter* die das Egofahrzeug betreffen. Dazu zählt die *Geschwindigkeit des Egofahrzeuges v1* ebenso wie der *Reibungskoeffizient zwischen Straße und Reifen  $\mu$* , der stark vom Untergrund und den Witterungsbedingungen abhängig ist (siehe Kapitel 2.3.4).

Weiters muss ein *Vollbremsfaktor f* angegeben werden, der die maximal ausgeführte Verzögerung beschreibt und so das menschliche Bremsverhalten abzubilden versucht. In einer Studie konnte nämlich festgestellt werden, dass eine Vielzahl der Fahrer die Bremse im Falle einer Notbremssituation nicht stark genug betätigen [24, S. 58] zit. nach [33].

Der Wert für die *Lenkübersetzung iS* wird in PC-Crash standardmäßig mit 15 angenommen. Es kann jedoch auch jeder andere benötigte Wert angegeben werden.

Die *Reaktionsdauer tRD* bis zu ersten Bremsaktivitäten muss ebenso festgelegt werden (siehe S. 26), wie die *Reaktionszeit Tk* bis zum Ausführen einer Lenkbewegung (siehe S. 43) oder der *„Time to Collision“-Reaktionspunkt TTC* der jenen Zeitpunkt beschreibt, ab dem vom Fahrer erkannt wird, dass ein Eingriff notwendig ist, um eine Kollision zu vermeiden.

Zusätzlich muss mit dem *Ausweichversatz Sv* noch jener Abstand bestimmt werden, der im Falle eines Ausweichmanövers erreicht werden soll.

## Methode

Des Weiteren fällt noch ein *vorzugebender Parameter des Hindernisses* an. Dabei handelt es sich um die *Geschwindigkeit  $v_2$*  eben dieses.

Neben den beschriebenen *vorzugebenden Parametern*, muss noch die Einstellung der *Blickabwendung* angegeben werden. Hier kann eingestellt werden, ob das Hindernis direkt im Blickfeld des Fahrers erscheint oder nicht. Muss der Fahrer erst seinen Blick in Richtung des Hindernisses bewegen, fällt zusätzlich noch eine *Blickzuwendungszeit* an. Dies wird im Modell berücksichtigt, indem der Status der *Blickabwendung* überprüft und gegebenenfalls die *Reaktionszeit* um die *Blickzuwendungszeit* erweitert wird.

Als *anzupassende Parameter* müssen die Werte für die *Vorausschaudistanz  $L_a$*  und die *Lenkwinkelverstärkung  $W$*  angegeben werden. Während die *Vorausschaudistanz  $L_a$*  beschreibt, wie weit voraus der Fahrer auf die vor ihm liegende Strecke blickt, beschreibt die *Lenkwinkelverstärkung  $W$* , wie stark die Lenkbewegung verstärkt wird. Je genauer diese Parameter angepasst werden, umso besser stimmt die *tatsächliche, reale Ausweichtrajektorie* mit der *idealen, berechneten Ausweichtrajektorie* überein. Die Anpassung dieser Parameter wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

### 3.6.1 Parameteranpassung

Wie bereits in Kapitel 3.6 erwähnt, ist es notwendig, die Parameter der *Lenkwinkelverstärkung  $W$*  und der *Vorausschaudistanz  $L_a$*  anzupassen, um die Ausweichtrajektorie möglichst gut anzunähern.

Aus Formel (2-1), die in Kapitel 2.3.2 näher beschrieben wurde, ist ersichtlich, dass diese beiden Parameter, den Lenkradwinkel  $\delta_1$  stark beeinflussen.

$$\delta_1(t) = \frac{W}{L_a} * y_a \left( t + \frac{L_a}{v} - T_k \right) - \frac{W}{L_a} * y_{0s}(t - T_k) - W * \psi(t - T_k) \quad (2-1)$$

Die *Vorausschaudistanz  $L_a$*  hat zusätzlich noch Einfluss auf die Ausweichtrajektorie. Dies kann aus Formel (3-6) aus Kapitel 3.2.2 gezeigt werden.

$$y = Sv * v * \left( \frac{(t - \frac{La}{v})}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2 * \pi * v * (t - \frac{La}{v})}{L} \right) \quad (3-6)$$

Es ist also wichtig zu verstehen, wie sich die beiden *anzupassenden Parameter* verhalten.

Um dies festzustellen, wurden Simulationen durchgeführt, in denen jeweils einer der beiden Parameter verändert und alle restlichen Werte konstant gehalten wurden.

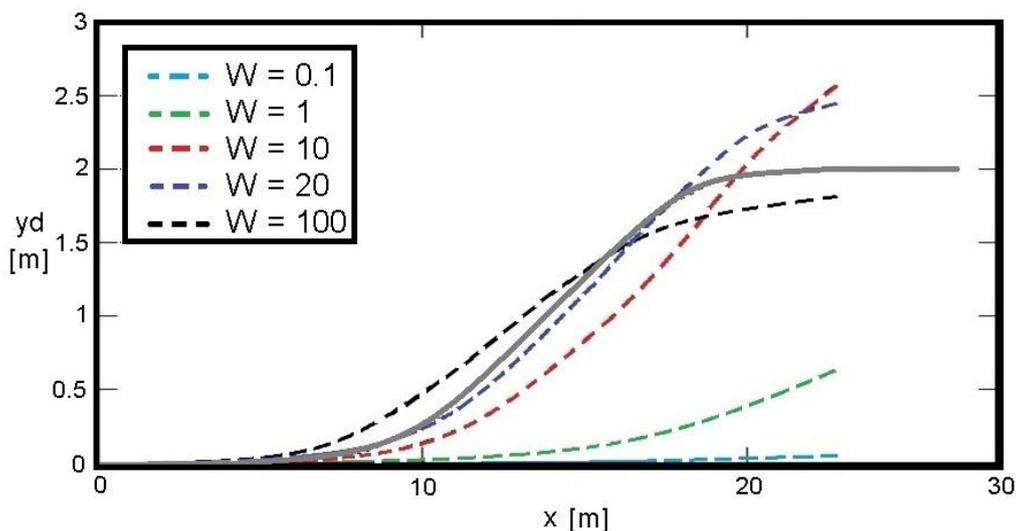


Abbildung 3-8: Änderung der Lenkwinkelverstärkung W

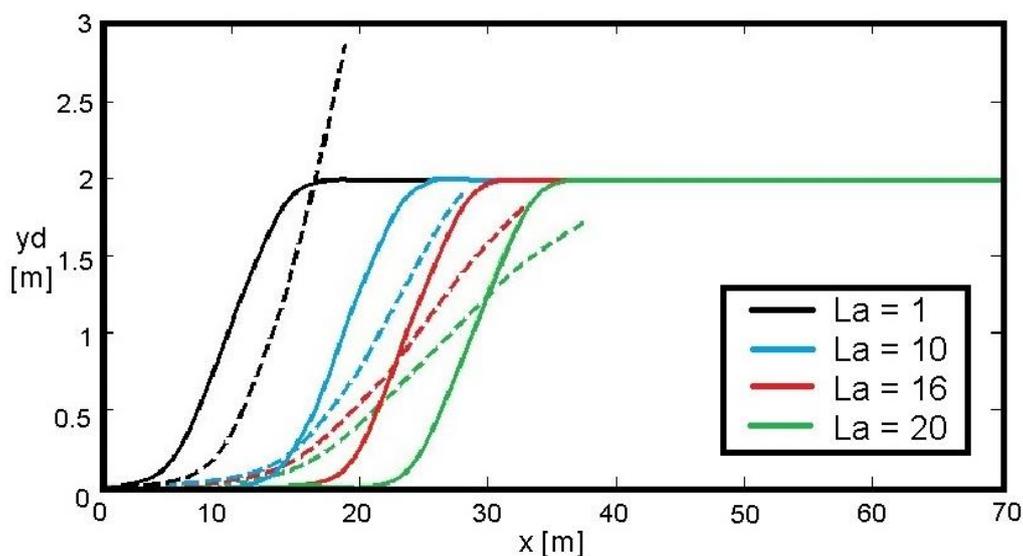
Das Ergebnis für unterschiedliche Werte der *Lenkwinkelverstärkung W* ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Die graue, durchgezogene Linie, stellt die *ideale Ausweichtrajektorie*, die die Referenz bildet, dar. Die strichlierten Linien in unterschiedlicher Farbgebung symbolisieren die *tatsächlichen Ausweichtrajektorien* mit unterschiedlichen Lenkwinkelverstärkungen. Es lässt sich erkennen, dass es besonders wichtig ist diesen Parameterwert möglichst genau zu treffen. Wird der Wert zu klein angenommen, so fällt die Trajektorie zu flach aus, da die Lenkbewegung zu wenig verstärkt (bzw. sogar abgeschwächt) wird. Es ist damit unmöglich in der geforderten *Wegstrecke x*, den gewünschten *Seitenversatz Sv* zu erreichen. Dazu wäre eine viel größere Wegstrecke erforderlich. Mit großer Wahrscheinlichkeit kann dem Hindernis nicht rechtzeitig ausgewichen werden, da der geforderte Seitenversatz nicht rechtzeitig erreicht werden kann.

## Methode

Wird der Wert jedoch zu groß gewählt, so werden die Lenkbewegungen zu stark verstärkt. Dies führt dazu, dass das Gegenlenken so stark verstärkt wird, dass der gewünschte Seitenversatz sehr flach angenähert wird und so ebenfalls viel Wegstrecke notwendig ist, um den gewünschten Seitenversatz zu erreichen.

Es lässt sich also feststellen, dass es sehr wichtig ist, den gesuchten Wert für die *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  möglichst genau zu finden, da sich eine Abweichung (egal ob nach oben oder unten) stark auf den Verlauf der Trajektorie auswirkt.

Betrachtet man unterschiedliche Werte für die *Vorausschaudistanz*  $La$ , so lässt sich die in Abbildung 3-9 dargestellte Tendenz erkennen. Die durchgezogenen Linien stellen wieder die *idealen Ausweichtrajektorien* dar, während die strichlierten Linien die *tatsächlichen Trajektorien* abbilden. Es lässt sich feststellen, dass die Ausweichtrajektorie umso flacher ausfällt, je größer die Vorausschaudistanz gewählt wurde. Dies lässt sich damit erklären, dass mit größerer Vorausschaufentfernung ein Hindernis oder eine Kurve früher erkannt werden kann. Daraus ergibt sich, dass das notwendige Manöver sowohl zeitlich als auch räumlich gesehen früher eingeleitet werden kann. Damit steht mehr Zeit bzw. Weg zur Verfügung, um den geforderten Seitenversatz zu erreichen und die Trajektorie fällt flacher aus. Auch hier gilt zu berücksichtigen, dass eine zu flache Ausweichtrajektorie, den Unfall möglicherweise nicht verhindern kann.

Abbildung 3-9: Änderung der Vorausschaudistanz  $La$

Um die anzupassenden Parameter möglichst gut festlegen und abstimmen zu können, wurde eine automatische Parameteranpassung eingeführt. Dazu werden mittels eines Kombinator unterschiedliche Parameterkombinationen durchgetestet und jene gewählt, die die geringste Abweichung aufweist. Dies ist notwendig, da eine gute Annäherung an die ideale Ausweichtrajektorie nur dann erreicht werden kann, wenn beide Parameterwerte gleichzeitig angepasst werden.

*Renski* berechnet die Abweichung der beiden Trajektorien in jedem Punkt und bildet daraus den Mittelwert [16]. Dies wird mit den beiden Formeln Formel (3-8) und Formel (3-9) erreicht.

In Formel (3-8) wird die *Abweichung*  $\Delta y$  der beiden Trajektorien für einen Punkt berechnet, indem die Differenz aus dem *y-Abstand der tatsächlichen Ausweichtrajektorie*  $y_{0s}$  und der *y-Abstand der realen Ausweichtrajektorie*  $y_a$  gebildet wird.

$$\Delta y = |y_{0s} - y_a| \quad (3-8)$$

Daraus kann in Formel (3-9) der Mittelwert aller betrachteten Punkte gebildet werden.

$$\langle \Delta y \rangle = \frac{\sum_n \Delta y}{n} \quad (3-9)$$

Im Modell wird die Abweichung nach jedem *Simulationsschritt*  $\Delta t$  berechnet. Daraus ergibt sich je nach Gesamtlänge des Manövers die *Anzahl*  $n$  der betrachteten Punkte, die für die Berechnung des Mittelwertes notwendig ist.

Für die Ausführung der automatischen Parameteranpassung, die ebenfalls in Matlab umgesetzt wurde, muss jeweils der gewünschte, zu überprüfende Wertebereich der beiden Parameter *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  und *Vorausschaudistanz*  $La$  angegeben werden. Dies ist exemplarisch in Tabelle 3-3 dargestellt. Für diesen betrachteten Fall ergeben sich auf Grund der angegebenen Parameterbereiche und Schrittweite 3000 Kombinationen, die durchgerechnet werden.

Tabelle 3-3: Ausgewählter Wertebereich für Parameteranpassung

	Startwert	Schrittweite	Endwert
<b>Lenkwinkelverstärkung <math>W</math></b>	1	1	60
<b>Vorausschaudistanz <math>L_a</math></b>	1	1	50

Durch die Angabe von Wertebereichen für die beiden zu suchenden Parameter, kann es vorkommen, dass Parameterkombinationen gebildet werden, die zu einer Trajektorie führen, welche aus technischer Sicht nicht umsetzbar ist, da der maximale Lenkwinkelschlag des Fahrzeuges überschritten wird. Diese Fälle sollen nicht berücksichtigt werden, da dieses Ergebnis nicht zielführend ist.

Umgesetzt wird diese Limitierung mit Hilfe des in jedem Simulationsschritt abgefragten *Lenkradwinkel*  $\delta_L$ . Der maximale Einschlagwinkel eines Personenkraftwagens in Serienausführung beträgt zwischen 45-50° [32, S. 463]. Wird im Modell ein Wert von 50° überschritten, so wird die Lenkung nicht mehr weiter eingeschlagen, da der maximal mögliche Einschlagwinkel erreicht wurde.

Nach der Festlegung des Wertebereichs der *anzupassenden Parameter*, wird das Lenkmodell für alle daraus möglichen Parameterkombinationen berechnet und jene Variante ausgewählt, die die geringste mittlere Abweichung von der *idealen Ausweichtrajektorie* aufweist.

Die Größe des angegebenen Wertebereichs beeinflusst durch die damit verbundene Anzahl der durchzurechnenden Kombinationsvarianten die Dauer der Berechnung.

Es ist zu berücksichtigen, dass die automatische Parameteranpassung nur jene Parameter liefert, die die geringste mittlere Abweichung in y-Richtung zwischen der tatsächlichen und der realen Ausweichtrajektorie realisieren. Diese Auswahl muss jedoch nicht automatisch die beste Wahl sein. Es muss auch der weitere Verlauf der Trajektorie und der tatsächliche *Seitenversatz*  $S_v$  im Endpunkt berücksichtigt werden.

So sollte die Abweichung des tatsächlichen Seitenversatzes im Endpunkt nicht zu stark vom vorgegebenen Wert abweichen. Der gewünschte Seitenversatz beruht auf Beobachtungen

der Gegebenheiten und Umwelt des Fahrers und wird von diesem nicht ohne Grund so vorgegeben.

Deshalb wurde eine Gewichtung eingeführt. Sie führt dazu, dass die Abweichungen im hinteren Drittel der Ausweichtrajektorie doppelt so stark gewichtet werden und deshalb mehr Einfluss auf die mittlere Abweichung haben.

In Abbildung 3-10 ist beispielhaft das Ergebnis der automatischen Parameteranpassung für einen Fall mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h angegeben. Es lässt sich erkennen, dass die ideale Ausweichtrajektorie und die tatsächliche Ausweichtrajektorie sehr gut übereinstimmen und sich vor allem im hinteren, stärker gewichteten Bereich stark überdecken.

In diesem Fall sind keine weiteren Maßnahmen notwendig. Die automatische Parameterwahl liefert also ein brauchbares Ergebnis und die daraus erhaltenen Parameterwerte für die *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  und die *Vorausschaudistanz*  $L_a$  können direkt in das Fahrermodell übertragen werden.

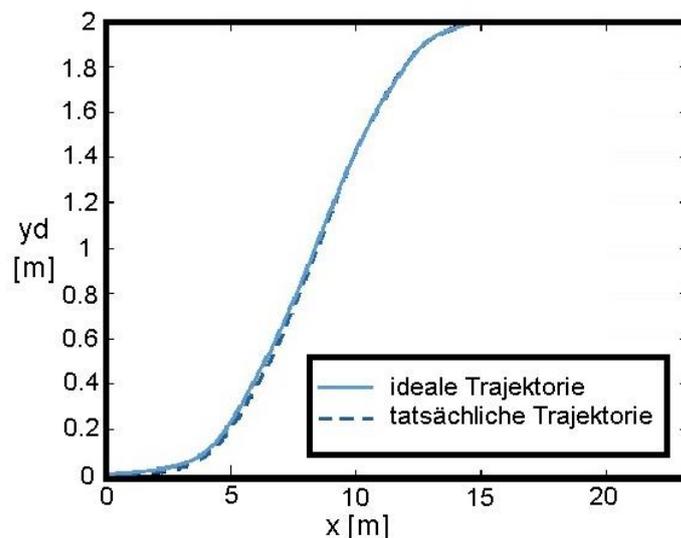


Abbildung 3-10: Ergebnis automatische Parameteranpassung 30 km/h

Dass dies nicht immer der Fall sein muss, zeigt das nächste Beispiel. Hier wurde eine automatische Parameteranpassung für eine Geschwindigkeit von 80 km/h erstellt. Wie aus

## Methode

Abbildung 3-11 ersichtlich, stimmen die beiden Kurven nicht mehr so gut überein. Unter der Berücksichtigung des Kurvenverlaufes am Ende und der starken Krümmung, die das Fahrzeug zum Schleudern bringt, müssen die Parameter manuell nachgebessert werden.

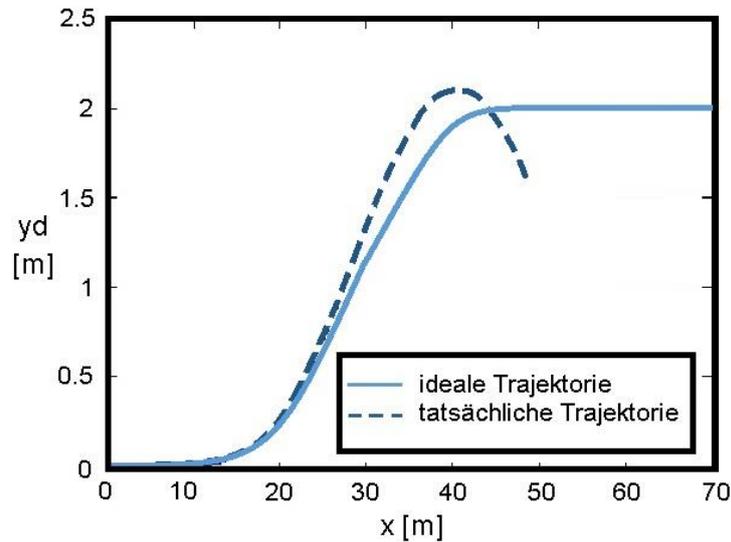


Abbildung 3-11: Ergebnis automatische Parameteranpassung 80 km/h

Es zeigt sich also, dass die automatische Parameterauswahl nicht immer die besten Ergebnisse liefert und deshalb unter Umständen manuell angepasst werden muss. Sie liefert aber einen guten Ansatz, um einen Anhaltspunkt zu erlangen, in welchem Bereich die Parameter zu suchen sind.

Allgemein kann festgestellt werden, dass mit steigender *Fahrzeuggeschwindigkeit*  $v_1$  tendenziell die *Vorausschaudistanz*  $L_a$  zunimmt, während die *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  abnimmt.

## 4. IMPLEMENTIERUNG

In diesem Kapitel soll auf die mit Matlab programmierte Umsetzung der in Kapitel 3 beschriebenen Methoden eingegangen werden. Um den grundlegenden Aufbau der Modelle beschreiben zu können, wird Pseudocode verwendet. Der vollständige Modell Quellcode ist im Anhang angeführt.

### 4.1 Implementierung des Fahrermodells

Einen Überblick über das Fahrermodell liefert die in Abbildung 4-1 dargestellte Flowchart. Die einzelnen Elemente werden im Folgenden Schritt für Schritt erklärt.

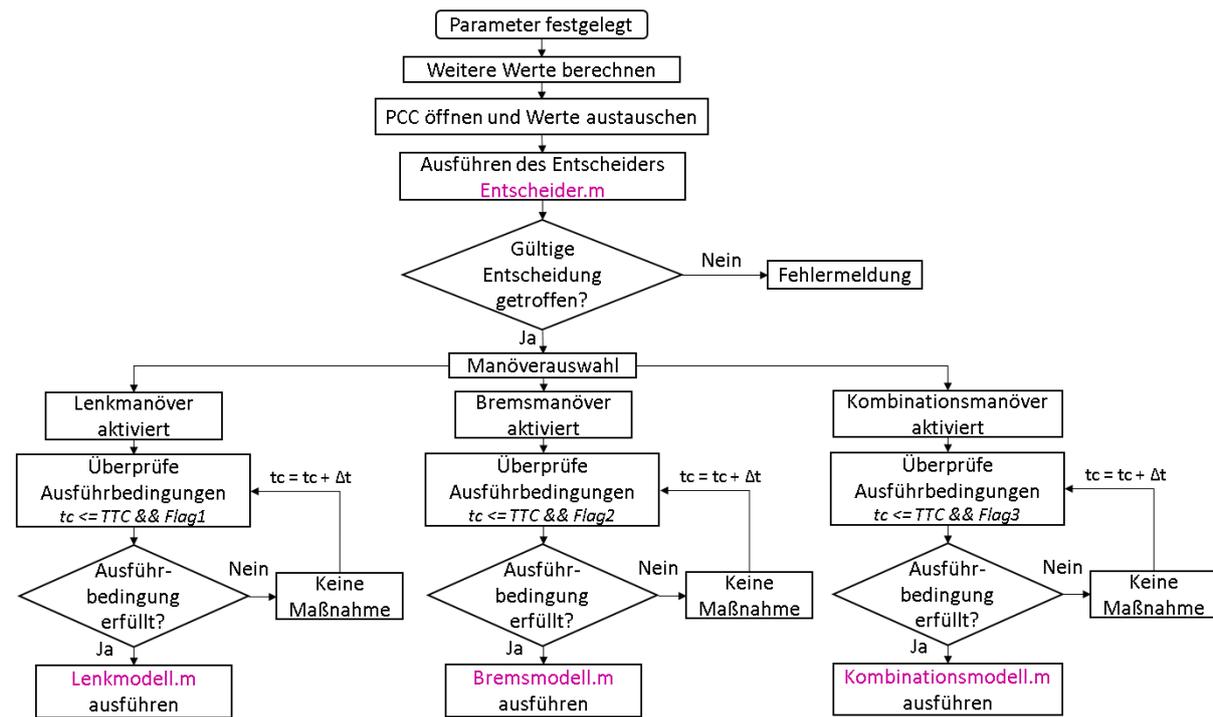


Abbildung 4-1: Flowchart des Fahrermodells

Im ersten Schritt müssen die in Kapitel 3.6 aufgelisteten Parameter festgelegt werden. Zusätzlich benötigte Informationen werden aus PC-Crash mit Hilfe der OLE-Schnittstelle ins Modell geladen. Mit diesen Informationen werden weitere Berechnungen durchgeführt.

## Implementierung

Nachdem alle benötigten Informationen festgelegt und berechnet wurden, kann der Entscheider ausgeführt werden.

Vor der Ausführung des Entscheiders ist der Status aller möglichen Manöver auf Null gesetzt, was einem Fahrzustand vor einer Vermeidungsentscheidung entspricht. Wird der Entscheider ausgeführt, so aktiviert er ein Manöver, indem er dessen Wert von Null auf Eins setzt. Unter Aktivierung versteht man die prinzipielle Auswahl des Reaktionsmanövers vom Entscheider. Dieses Manöver wird jedoch noch nicht ausgeführt (ausgelöst), solange die Bedingung dazu nicht erfüllt wurde (siehe Formel (3-1)).

Die Auslösung funktioniert bei allen drei Manövern gleich und wird in Algorithmus 4.1 beschrieben.

Ist das auszuführende Manöver aktiviert (Manöver wurde auf Eins gesetzt), so wird es zu jenem Zeitpunkt ausgelöst, wenn die berechnete *Kollisionszeit*  $t_c$  kleiner oder gleich der vorgegebenen *TTC*, welche als Auslösezeit fungiert, ist (siehe Kapitel 3.1).

Zusätzlich muss noch eine *Flag* aktiviert sein, um das Modell ausführen zu können. Diese *Flag* wurde für zukünftige Programmiererweiterungen eingebaut und soll die Möglichkeit bieten, dass das Modell auch dann nicht ausgeführt wird, wenn zwar grundsätzlich die Kollisionszeitbedingung erfüllt ist, aber ein zusätzlicher Umstand gegen das Ausführen des Manövers spricht.

Als Beispiel sei hier ein entgegenkommendes Fahrzeug angeführt, welches augenscheinlich an der vorausliegenden Kreuzung abbiegt und so eine Kollision ausgeschlossen werden kann. Nach erfolgreicher Ausführung des Manövers wird dieses durch Aktivierung des *Break*-Befehls beendet.

Wird die Bedingung zum Auslösen des Manövers nicht erfüllt, so fährt das Fahrzeug ohne Reaktion geradeaus weiter. Dies ist dann der Fall, wenn die berechnete *Kollisionszeit*  $t_c$ , den Wert der *TTC* noch nicht erreicht bzw. unterschritten hat. Dann wird die implementierte *while*-Schleife solange durchlaufen bis die Bedingung erfüllt wird. Mit jedem Durchlauf wird die *Kollisionszeit*  $t_c$  um 0,015 s verringert. Diese Zeit entspricht einem Simulationsschritt.

```
tc = Kollisionszeit am Startzeitpunkt;

if Manöver aktiviert
    while (true)
        if tc <= TTC && Flag
            run Manoever.m
            break
        else
            Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
        end
        tc = tc - 0.015;
    end
end
```

Algorithmus 4.1: Auslösung eines Manövers

## 4.2 Implementierung des Entscheiders

Der Entscheider soll je nach vorliegender Gefahrensituation, auf Basis der in Kapitel 3.5 und Kapitel 2.3.5.2 beschriebenen Wahrscheinlichkeiten eine Auswahl für das durchzuführende Manöver treffen.

Dazu muss der Inhalt aus Abbildung 2-18 im Entscheider implementiert sein. Sind die Wahrscheinlichkeiten der Ausführung der Manöver für alle berücksichtigten Situationen implementiert, so kann mittels Generierung einer Zufallszahl im Wertebereich zwischen Eins und Null simuliert werden, welche Entscheidung getroffen wird. Da es drei auszuwählende Manöver gibt, ist die Auswahl wie in Algorithmus 4.2 beschrieben, aufgebaut.

```
w1 = generierte Zufallszahl zwischen 0 und 1;

if w1 <= Wahrsch. Bremsen
    Bremsen = 1;
elseif w1 > Wahrsch. Bremsen && w1 < Wahrsch. Bremsen + Wahrsch. Lenken
    Lenken = 1;
elseif w1 >= Wahrsch. Bremsen + Wahrsch. Lenken
    Kombi = 1;
end
```

Algorithmus 4.2: Implementierung der Manöverauswahl

Ist der *generierte Wert*  $w1$  kleiner oder gleich groß als die Wahrscheinlichkeit für das Bremsmanöver, so ist die Bedingung erfüllt und das Bremsmanöver wird aktiviert.

## Implementierung

Ist der Wert größer als die Wahrscheinlichkeit für das Bremsmanöver, aber kleiner als die Summe der Wahrscheinlichkeiten für Bremsen und Lenken, so soll das Lenkmanöver aktiviert werden.

Erst wenn der *generierte Wert*  $w1$  größer oder gleich groß als die Summe der Wahrscheinlichkeiten aus Bremsen und Lenken ist, so wird das Kombinationsmanöver aktiviert.

### 4.3 Implementierung des Ausweichmodells

Ist das Ausweichmodell aktiviert und ausgelöst, so wird im ersten Schritt nach Formel (3-6), der für jeden Zeitschritt benötigte *y-Abstand der idealen Ausweichtrajektorie*  $y_d$  ermittelt.

Im nächsten Schritt wird eine *Zeitvariable*  $tTk$  erzeugt, die mit der Auslösung des Modells startet.

Um die *Lenkreaktionszeit*  $Tk$  berücksichtigen zu können, ist eine *while*-Schleife implementiert. Sie legt fest, dass es zu keiner Lenkreaktion kommt, bevor die definierte *Lenkreaktionszeit*  $Tk$  nicht erreicht wurde. Mit jedem Durchlauf wird ein Vorwärtssimulationsschritt gerechnet und die *Zeitvariable*  $tTk$  angepasst, indem ihr Wert um 0,015 s erhöht wird.

Erreicht der Wert der *Zeitvariable*  $tTk$  jenen der *Lenkreaktionszeit*  $Tk$  und ist zusätzlich die eingebaute *Flag* aktiviert, so werden die aktuellen Parameterwerte des *Gierwinkels*  $\psi$  und der *tatsächlichen lateralen Wegabweichung*  $y_{0s}$  aus PC-Crash ins Modell geladen.

Damit kann in weiterer Folge auf Basis von Formel (2-1) der für diesen Simulationsschritt aktuelle *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  berechnet werden. Die beiden *Laufvariablen*  $m$  und  $n$  werden benötigt, um die richtigen Werte zur Berechnung des Lenkradwinkels ansprechen zu können. Die *Laufvariable*  $n$  ist gegenüber der *Laufvariablen*  $m$  um die Anzahl der Simulationsschritte bis zum Vorausschaupunkt nach vorne versetzt.

Im nächsten Schritt wird überprüft, ob dieser berechnete *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  technisch umsetzbar ist. Falls der maximal ausführbare *Lenkradwinkel*  $\delta_L$  überschritten ist, so wird der

Lenkwinkelschlag auf den maximal möglichen Wert zurückgesetzt. Dies ist in Algorithmus 4.4 nochmal detaillierter dargestellt.

Zuletzt wird der erhaltene Lenkradwinkel mit Hilfe der Lenkübersetzung  $i_S$  und der Ackermannlenkbedingung gemäß Formel (3-2) und Formel (3-4) auf die benötigten Radlenkwinkel für das linke  $\delta_{LR}$  und rechte Vorderrad  $\delta_{RR}$  umgerechnet.

Die Implementierung des in diesem Kapitel beschriebenen Ausweichvorgangs ist in Algorithmus 4.3 als Pseudocode ausgeführt.

```

m = 1;
n = Wert des Vorausschaupunkts;

tTk = 0;
tT = 0;

while tTk < Lenkreaktionszeit
    Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    tTk = tTk + 0.015;
    m = m + 1;
end

while (true)
    if tTk >= Lenkreaktionszeit && Flag
        Einlesen aktueller Gierwinkel aus PCC
        Einlesen aktuelle laterale Wegabweichung aus PCC

        Berechnung der Lenkradwinkel
        Kontrolle der Umsetzbarkeit der Lenkradwinkel
        Umrechnung von Lenkradwinkel auf Radlenkwinkel
        Uebertragung der Radlenkwinkel in PCC

        Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    end

    if Ausweichtrajektorie komplett durchlaufen
        break
    end

    tT = tT + 0.015;
    tTk = tTk + 0.015;
    m = m + 1;
    n = n + 1;
end

```

Algorithmus 4.3: Implementierung des Ausweichvorgangs

## Implementierung

```

if deltaL(m) > max. mögl. Winkel
    deltaL(m) = max. mögl. Winkel;

elseif deltaL(m) <= max. mögl. Winkel && deltaL(m) >= -max. mögl. Winkel

elseif deltaL(m) < -max. mögl. Winkel
    deltaL(m) = -max. mögl. Winkel;
end

```

Algorithmus 4.4: Festlegung des Einschlagwinkels unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit

## 4.4 Implementierung des Bremsmodells

Wird das Bremsmodell aktiviert und die Auslösebedingung erfüllt, so wird das Bremsmodell gestartet.

Auch in diesem Modell wird zu Beginn eine *Zeitvariable*  $tZ$  erzeugt, die mit der Auslösung des Bremsmodells zu laufen beginnt.

Das Bremsmodell ist aus mehreren *while*-Schleifen aufgebaut. Der Ablauf ist in Algorithmus 4.5 dargestellt.

```

while tZ <= Reaktionszeit
    Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    tZ = tZ + 0.015;
end

while tZ > Reaktionszeit && tZ <= Reaktionszeit+Schwellzeit
    Bremsen mit mittlerer Schwellbremsverzögerung
    Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    tZ = tZ + 0.015;
end

while tZ > Reaktionszeit+Schwellzeit && tZ < Anhaltezeit
    Bremsen mit maximaler Bremsverzögerung
    Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    tZ = tZ + 0.015;
end

break

```

Algorithmus 4.5: Implementierung des Bremsvorgangs

Bei der Ausführung des Bremsmodells wird eine der drei *while*-Schleifen durchlaufen, da die *Zeitvariable*  $tZ$ , eine der drei Bedingungen so lange erfüllt, bis deren Wert größer als die

*Anhaltezeit*  $t_A$  wird. Ab diesem Zeitpunkt hat das Fahrzeug seine gesamte Geschwindigkeit abgebaut und kommt zum Stillstand.

Welche *while*-Schleife durchlaufen wird, hängt davon ab, wie weit die *Zeitvariable*  $t_Z$  fortgeschritten ist. Solange die *Zeitvariable*  $t_Z$  nicht größer als die festgelegte *Reaktionszeit*  $t_R$  ist wird kein Bremsvorgang eingeleitet. Der Fahrer bzw. das Fahrzeug befindet sich in der Reaktionsphase.

Ist der Wert der *Zeitvariable*  $t_Z$  im Zeitbereich zwischen der *Reaktionszeit*  $t_R$  und der Summe aus *Reaktionszeit*  $t_R$  und *Schwellzeit*  $t_S$ , so befindet sich das Fahrzeug in der Schwellphase. In diesem Fall wird die zweite Schleife durchlaufen und das Fahrzeug erfährt eine Geschwindigkeitsreduktion in Höhe der Schwellbremsverzögerung, die gemäß Abbildung 3-6 der halben Vollbremsverzögerung entspricht.

Sobald die *Zeitvariable*  $t_Z$  größer als die Summe aus *Reaktionszeit*  $t_R$  und *Schwellzeit*  $t_S$  ist befindet sich das Fahrzeug in der Vollbremsphase. Dabei wird die dritte Schleife durchlaufen und die dafür berechnete Verzögerung ausgeführt.

## 4.5 Implementierung des Kombinationsmodells

Im Kombinationsmodell sind sowohl Teile des Ausweichmodells als auch des Bremsmodells implementiert. Dabei wurden beide Modelle so miteinander verknüpft, dass sich bei der Ausführung des Kombinationsmodells ein kombiniertes Brems- und Lenkmanöver ergibt. Der Aufbau ist in Algorithmus 4.6 dargestellt.

Den Grundaufbau bildet das Ausweichmodell. Die Teile des Bremsmodells wurden nach dem Befehl für die Übertragung der berechneten Radlenkwinkel in PC-Crash eingeführt. Es fällt auf, dass im Gegensatz zum reinen Bremsmodell nur zwei *while*-Schleifen eingefügt sind, die das Verzögerungsverhalten simulieren. Die *while*-Schleife, welche die Bremsreaktionsphase simuliert, kann weggelassen werden, da hier nicht garantiert werden muss, dass das Fahrzeug geradeaus fährt. Im Gegenteil dazu muss sogar die Möglichkeit einer Lenkbewegung bestehen, sonst könnte das zeitgleich eingeleitete Ausweichmanöver nicht durchgeführt werden.

## Implementierung

```

m = 1;
n = Wert des Vorausschaupunkts;

tTk = 0;
tT = 0;
tZ = 0;

while tTk < Lenkreaktionszeit
    Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    tTk = tTk + 0.015;
    m = m + 1;
end

while (true)
    if tTk >= Lenkreaktionszeit && Flag
        Einlesen aktueller Gierwinkel aus PCC
        Einlesen aktuelle laterale Wegabweichung aus PCC

        Berechnung des Lenkradwinkels
        Kontrolle der Umsetzbarkeit des Lenkradwinkels
        Umrechnung von Lenkradwinkel auf Radlenkwinkel
        Übertragung der Radlenkwinkel in PCC

        while tZ > Reaktionszeit && tZ <= Reaktionszeit+Schwellzeit
            Bremsen mit mittlerer Schwellbremsverzögerung
            Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
        end

        while tZ > Reaktionszeit+Schwellzeit && tZ < Anhaltezeit
            Bremsen mit maximaler Bremsverzögerung
            Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
        end

        Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt
    end

    if Ausweichtrajektorie komplett durchlaufen
        break
    end

    tZ = tZ + 0.015;
    tT = tT + 0.015;
    tTk = tTk + 0.015;
    m = m + 1;
    n = n + 1;
end

```

Algorithmus 4.6: Implementierung des Kombinationsmodells

## 4.6 Implementierung der automatischen Parameteranpassung

Die automatische Parameteranpassung wurde auf Basis des Lenkmodells erstellt.

Nach Festlegung der *vorzugebenden Parameterwerte*, muss der zu untersuchende Wertebereich für die beiden *anzupassenden Parameter Lenkwinkelverstärkung  $W$  und Vorausschaulistanz  $L_a$*  festgelegt werden.

Für die Berechnung der Werte werden die gesuchten Parameter indiziert. Mittels zweier *for*-Schleifen, von denen jede jeweils einen anzupassenden Parameter variiert, werden alle sich aus den festgelegten Wertebereichen ergebenden Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt. Dies ist in Algorithmus 4.7 ersichtlich.

Die zu untersuchenden Parameterbereiche werden jeweils als Vektor angegeben.

Die *for*-Schleifen sind so aufgebaut, dass sie bei jedem Durchlauf nach der Reihe Vektorelement für Vektorelement ansprechen.

Nach der Berechnung des Lenkradwinkels und der Rückführung der beiden Radlenkwinkel in PC-Crash (wie in Kapitel 4.3 beschrieben), wird die sich ergebende Abweichung zwischen tatsächlichem  $y$ -Abstand und idealem, berechneten Wert, überprüft. Diese Abweichung, die sich nach Formel (3-8) ergibt, wird für jeden Vorwärtssimulationsschritt berechnet und für jede Parameterkombination in einem eigenen Fehlervektor gespeichert.

Daraus kann nach der Gewichtung (siehe Kapitel 3.6.1) auf Grundlage von Formel (3-9) die mittlere Abweichung berechnet werden.

Die Gewichtung erfolgt, indem der beschriebene Fehlervektor mit einem Gewichtungsvektor elementweise multipliziert wird.

## Implementierung

```

W = [Startwert:Schrittweite:Endwert];
La = [Startwert:Schrittweite:Endwert];

m = 1;
n = Vorausschaupunkt;

tTk = 0;
tT = 0;

for i=1:length(W)
    for j=1:length(La)

        while tTk < Tk
            tTk = tTk + 0.015;
            m = m + 1;
        end

        while (true)
            if tTk >= Lenkreaktionszeit && Flag
                Einlesen aktueller Gierwinkel aus PCC
                Einlesen aktuelle laterale Wegabweichung aus PCC

                Berechnung der Lenkradwinkel
                Kontrolle der Umsetzbarkeit der Lenkradwinkel
                Umrechnung von Lenkradwinkel auf Radlenkwinkel
                Übertragung der Radlenkwinkel in PCC

                Vorwärtssimulation um einen Simulationsschritt

                Fehler berechnen
            end

            if Ausweichtrajektorie komplett durchlaufen
                break
            end

            tT = tT + 0.015;
            tTk = tTk + 0.015;
            m = m + 1;
            n = n + 1;
        end

        Fehlergewichtung
    end
end

Bestimmung des Minimalfehlers
Ausgabe der ermittelten Parameterwerte

```

Algorithmus 4.7: Implementierung der Parameteranpassung

Wie schon in Kapitel 3.6.1 beschrieben, können sich bei der Berechnung der Parameterkombinationen Varianten ergeben, die zu einem Radeinschlagwinkel führen, der

technisch für ein reales Fahrzeug nicht umsetzbar ist. Um diese Fälle in der Endauswahl nicht miteinzubeziehen, wird die im Algorithmus 4.4 dargestellte Berücksichtigung des maximalen Lenkradwinkels um einen Kontrollvektor erweitert. Wie in Algorithmus 4.8 beschrieben, wird, sobald in einem Simulationsschritt ein zu großer Lenkradwinkel auftritt, im Kontrollvektor an Stelle einer Null eine Eins notiert.

```
if deltaL(m) > max_moegl_Winkel
    deltaLKontrolle(m) = 1;
    deltaL(m) = max_moegl_Winkel;
elseif deltaL(m) <= max_moegl_Winkel && deltaL(m) >= -max_moegl_Winkel
    deltaLKontrolle(m) = 0;
elseif deltaL(m) < -max_moegl_Winkel
    deltaLKontrolle(m) = 1;
    deltaL(m) = -maximal_moegl_Winkel;
end
```

Algorithmus 4.8: Kontrollvektor zur Überprüfung des maximalen Lenkradwinkels

Im Anschluss wird die Summe der Elemente dieser Kontrollvektoren gebildet. Ist diese Summe größer als Null, so bedeutet das, dass der maximale Lenkeinschlagwinkel zumindest einmal überschritten wurde. Diese Summen werden gesammelt in einer Matrix gespeichert, die alle Parameterkombinationen beinhaltet.

Für die weitere Berechnung wird diese Matrix entweder auf Eins (*true*) gesetzt, wenn ihre Summe kleiner als Ein ist, oder im Falle einer Summe größer als Eins auf NaN (*Not a Number*). Damit kann festgestellt werden, ob im Laufe der Simulation mit den unterschiedlichen Parameterkombinationen der maximale Lenkwinkel überschritten wurde. Dies ist im Algorithmus 4.9 dargestellt.

```
Kontrolle(i,j) = sum(deltaLKontrolle);
if Kontrolle(i,j) < 1
    KontrolleLogic(i,j) = 1;
else
    KontrolleLogic(i,j) = NaN;
end
```

Algorithmus 4.9: Kontrollmatrix

## Implementierung

Wird die auf diese Weise entstandene Matrix mit dem gewichteten Fehlervektor multipliziert, so kann aus diesem Ergebnis auf einfache Art das Minimum und die damit verbundenen Parameter bestimmt werden.

Dieser Vorgang ist Algorithmus 4.10 zu entnehmen. Mittels Matlab-Befehl, kann das Minimum der Matrix lokalisiert (Reihe, Spalte) und diese Stelle mit den dazugehörigen Parameterwerten ausgegeben werden.

Wurde keine einzige in der Realität ausführbare Parameterkombination gefunden, so weist eine Fehlermeldung auf diesen Umstand hin.

```
fehlergewKont = fehlergew .* KontrolleLogic;

[minF, I] = min(fehlergewKont(:));
[I_row, I_col] = ind2sub(size(fehlergewKont), I);

if isnan(minF) == 1
    error('Fehlermeldung')
    minW = NaN;
    minLa = NaN;
else
    minW = W(I_row);
    minLa = La(I_col);
end
```

Algorithmus 4.10: Bestimmung der Parameterwerte

## 5. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Das in den vorigen beiden Kapiteln beschriebene und entwickelte Fahrermodell, wird nun an einigen Szenarios angewendet. Um zu zeigen, dass sich dieses Fahrermodell innerhalb der eingangs erwähnten Gültigkeitsgrenzen gut durchführen lässt, wurden sofern dies die geforderten Randbedingungen zuließen, möglichst unterschiedliche Situationen simuliert.

Dabei wird in beiden beschriebenen Szenarios eine Verkehrssituation geschaffen, die ein Handeln des Egofahrzeuges und somit den Einsatz des Fahrermodells erforderlich macht, um eine Kollision zu vermeiden oder zumindest die Fatalität des Ausgangs so gering wie möglich zu halten.

Gemäß dem Modellaufbau wird eine der drei möglichen Reaktionen auf Basis des Entscheiders ausgeführt. Dabei gilt anzumerken, dass mit Hilfe des Fahrermodells nur das menschliche Fahrverhalten nachgeahmt bzw. abgebildet wird und nicht jenes Fahrmanöver ausgewählt wird, das einen möglichen Unfall am ehesten verhindert. Es wird also nur jene Entscheidung ausgeführt, die dem menschlichen Handeln gemäß den implementierten Verhaltensregeln am ehesten entspricht. Im Idealfall sollte sich der Fahrer aber für jenes Manöver entscheiden, durch welches sich der Unfall am besten vermeiden lässt.

### 5.1 Simulationen

#### 5.1.1 Generisches Modell – Ausscherendes Fahrzeug aus Kolonne

Im ersten Versuch handelt es sich um ein Szenario, wie es oft auf mehrspurigen Straßen vorkommt.

Die hier dargestellte Variante bezieht sich auf eine innerstädtische Verkehrssituation. Für eine Variante auf Autobahnen oder Landstraßen müssten jedoch nur die Reaktionszeiten gemäß *Powelleit* [21] angepasst werden (siehe Seite 42f) .

Auf der rechten Fahrspur bewegt sich eine Fahrzeugkolonne bestehend aus drei Fahrzeugen voran. Auf der mittleren Fahrspur bewegt sich das Egofahrzeug räumlich nach hinten versetzt in dieselbe Richtung. Dieses Szenario ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

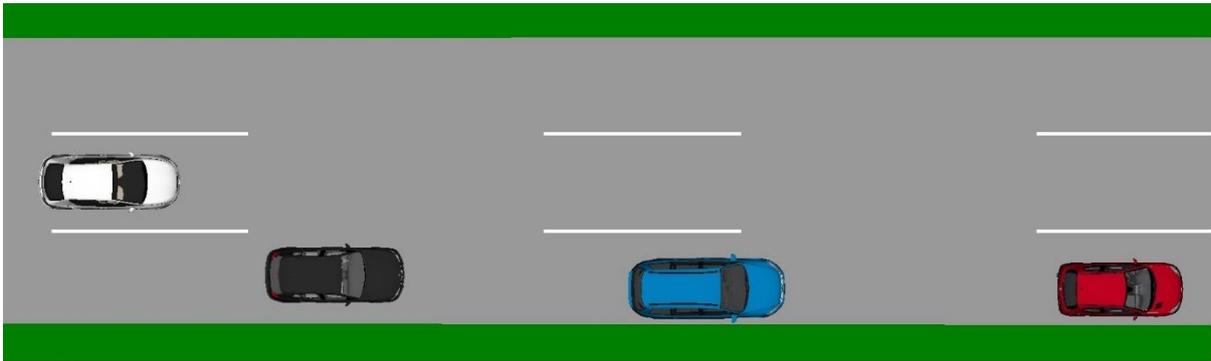


Abbildung 5-1: Szenario zu Beginn der Simulation

Um das davor fahrende Fahrzeug zu überholen oder sich möglicherweise für die vorausliegende Kreuzung richtig einordnen zu können, schiebt das mittlere Fahrzeug der Kolonne nach links aus und übersieht dabei das sich auf dieser Fahrspur befindliche Egofahrzeug. Dieses Manöver ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

Auf Grund der vorhandenen Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge, ist eine Reaktion des Egofahrzeuges notwendig, um eine Kollision zu verhindern.

Diese Reaktion wird durch das implementierte Fahrermodell ausgeführt.

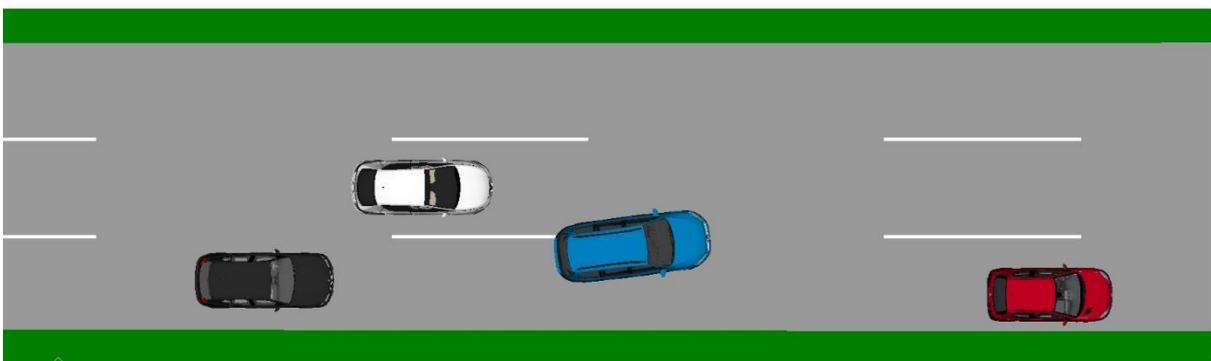


Abbildung 5-2: Szenario erfordert Reaktion des Ego-Fahrzeugs

Beim Zeitpunkt des Erkennens, dass eine Reaktionsmaßnahme notwendig ist, ergibt sich eine *TTC* von 2 Sekunden. Dies bedeutet, dass gemäß Abbildung 2-18 die Reaktion so verteilt ist, dass mit 46-prozentiger Wahrscheinlichkeit ein Bremsmanöver eingeleitet wird, während mit 38-prozentiger Wahrscheinlichkeit ein Kombinationsmanöver und mit 16-prozentiger Wahrscheinlichkeit ein reines Ausweichmanöver durchgeführt wird.

Um das Fahrermodell ausführen zu können, sind wie in Kapitel 3.6 beschrieben, neben den vorgegebenen Parametern und Einstellungswerte auch die beiden anzupassenden Parameter *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  und *Vorausschaudistanz*  $La$  anzugeben.

Diese Werte müssen mit Hilfe der Parameteranpassung gewählt werden. Auf Grund der vorgegebenen Randbedingungen des Szenarios, ergibt sich für die *Lenkwinkelverstärkung*  $W$  als auch für die *Vorausschaudistanz*  $La$  jeweils ein Wert von 11.

Unter der Szenarioannahme, dass sich die Fahrzeuge der Kolonne auf der rechten Fahrspur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 km/h und das Ego-Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h fortbewegen, liegt die Relativgeschwindigkeit bei 40 km/h. Zusätzlich wurde eine Reaktion ab einer TTC von 2 s festgelegt.

Unter diesen Annahmen kann mit allen drei implementierten Manövern ein Unfall vermieden werden. Dies ist in Abbildung 5-3 ersichtlich. Im Bild sind die Fahrzeugumrisslinien eingezeichnet. Es lässt sich erkennen, dass es bei allen drei Manövervarianten zu keiner Zeit zu einer räumlichen Überschneidung dieser Linien kommt.

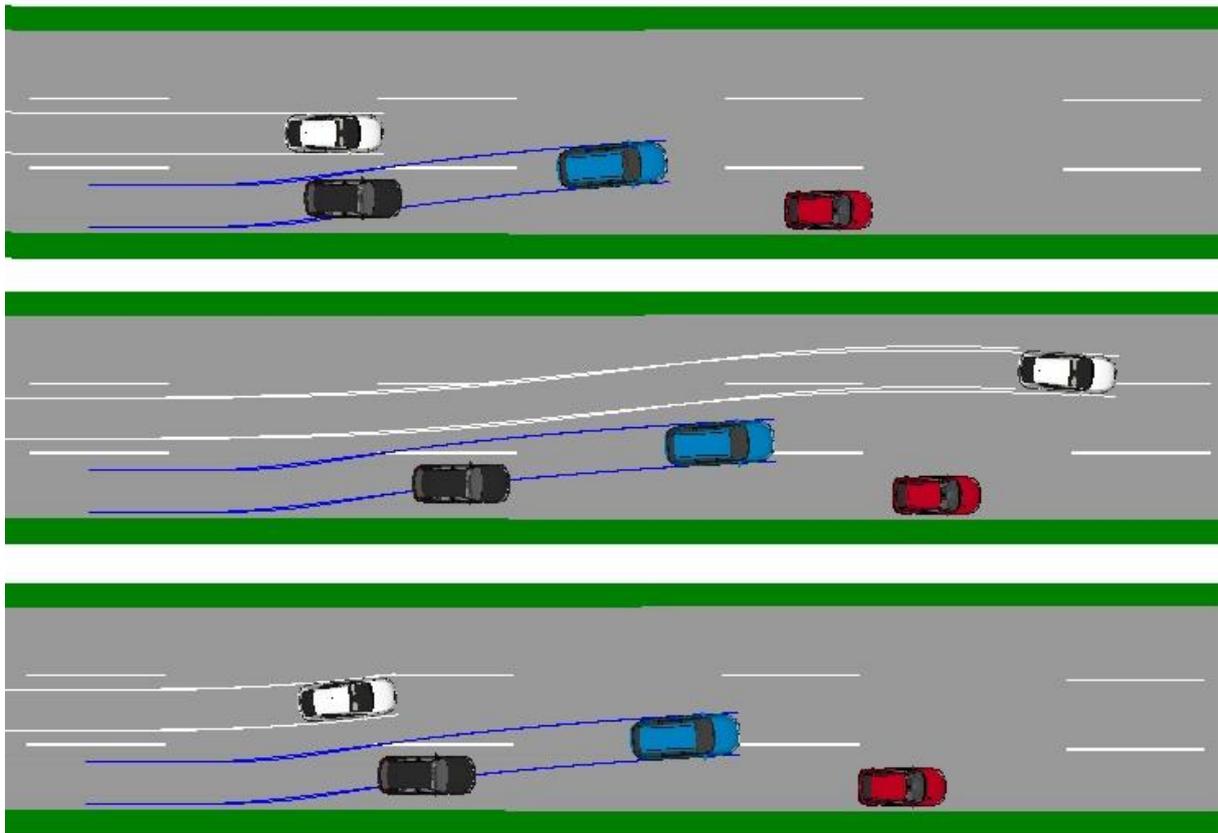


Abbildung 5-3: Fahrzeugumrisslinien bei der Manöverausrührung des generisch erstellten Szenarios  
(oben: Bremsmanöver; mittig: Ausweichmanöver; unten: Kombinationsmanöver)

Das bedeutet, dass der Fahrer unter den getroffenen Annahmen, sowohl mit einem reinen Vollbremsmanöver, also auch mit einem reinen Ausweichmanöver oder einem kombinierten Manöver, den Unfall verhindern kann.

#### **5.1.1.1 Diskussion des Fahrermodells im Anwendungsfall des generischen Unfallszenarios**

Es lässt sich erkennen, dass das entwickelte Fahrermodell nicht ideal für jedes Szenario geeignet ist, auch wenn dieses Szenario den beschriebenen Anforderungen entspricht.

So ist bei Szenarios mit Richtungsverkehr - wie im angewendeten Fall - nicht zwingend eine Notbremsung bis zum Stillstand erforderlich. In dieser Verkehrssituation würde auch eine Geschwindigkeitsreduktion auf die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges bzw. etwas darunter - bis der benötigte Sicherheitsabstand wieder hergestellt wurde - ausreichen. Dies wurde im aktuellen Modell aber noch nicht implementiert.

Ein weiteres Problem dieses Szenarios im Bezug auf die Anwendung mittels des entwickelten Fahrermodells liegt darin, die Basis für den Reaktionspunkt festzulegen, ab dem der Fahrer erkennt, dass eine Handlung erforderlich ist.

Als Reaktionspunkt wurde dabei der *Konfliktpunkt* ausgewählt, der mit dem Überfahren der Leitlinie des generischen Fahrzeuges festgelegt wurde. Da jeder Mensch ein unterschiedliches Gefahrenempfinden hat, ist dies allerdings nur als Näherungswert anzunehmen. Einen einzelnen exakten Auslösepunkt, ab dem jeder Fahrer reagiert, gibt es nicht.

Dies bedeutet, dass das in dieser Arbeit entwickelte Fahrermodell zwar grundsätzlich geeignet ist, um das menschliche Verhalten im dargestellten Szenario zu simulieren. Bestimmte ausgeführte Maßnahmen in diesem Anwendungsfall entsprechen dabei aber nicht unbedingt dem realen Verhaltensfällen der fahrzeugführenden Person des Egofahrzeuges.

### 5.1.2 Realunfall – Fußgängerunfall

Als zweites Szenario wurde ein tatsächlich stattgefundenener Fußgängerunfall gewählt. Der Unfall wurde aus der Unfalldatenbank ZEDATU (*zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen*) ausgewählt.

Im Szenario überquert ein Kind eine Seitenstraße indem es ohne auf den Verkehr zu achten zwischen geparkten Autos über die Straße läuft.

Gleichzeitig nähert sich ein Fahrzeug von rechts kommend mit 28 km/h. Durch die Verdeckung der parkenden Fahrzeuge sowie durch Pflanzenbewuchs, ist das Kind für die fahrzeugführende Person erst sehr spät zu erkennen.

Erst ab einer TTC von 1,2 s hat der Fahrer freie Sicht auf das Kind. Dieser Zeitpunkt ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

## Ergebnisse und Diskussion



Abbildung 5-4: Zeitpunkt an dem das Kind wahrgenommen wird.

In Abbildung 5-5 ist das Szenario aus der Sicht des Fahrers zu jenem Zeitpunkt dargestellt, ab dem das Kind aus seiner Position sichtbar wird.



Abbildung 5-5: Auftauchen des Kindes aus der Fahrerperspektive

Selbst unter der Annahme, dass der Fahrer das Kind sofort im Blickfeld hat, da er den Kopf in Richtung der parkenden Fahrzeuge gerichtet hat und somit keine *Blicksakkade* und die damit verbundene längere Reaktionszeit notwendig ist, benötigt das Fahrzeug 0.69 s, bis eine erste Geschwindigkeitsreduktion in der Schwellphase eintritt. Ebenso werden mindestens 0,57 s benötigt, bis eine Lenkreaktion eingeleitet wird.

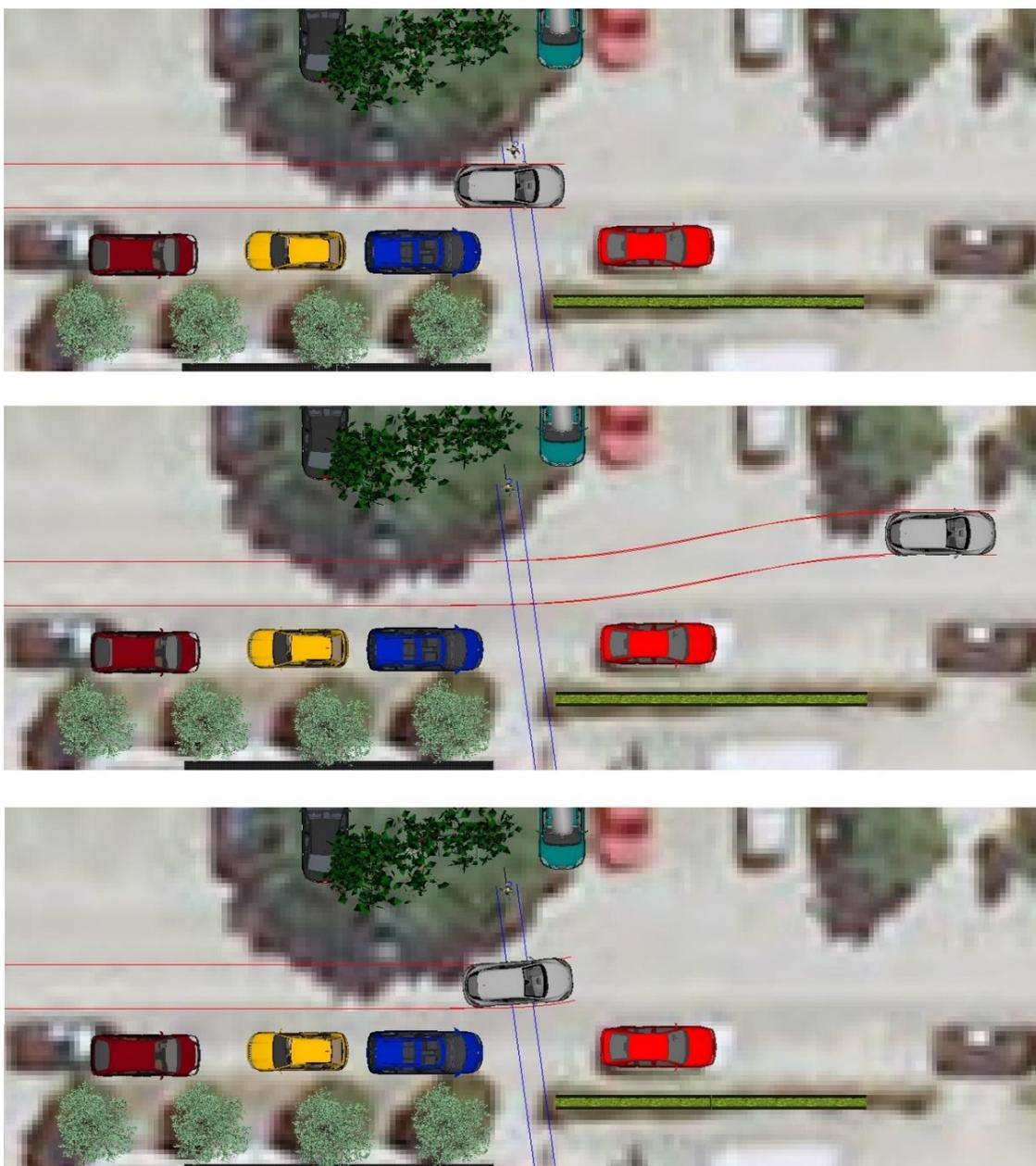


Abbildung 5-6: Fahrzeugumrisslinien bei der Manöverausführung des ausgewählten Realunfalls  
(oben: Bremsmanöver; mittig: Ausweichmanöver; unten: Kombinationsmanöver)

Es lässt sich erkennen, dass auf Grund der geringen verbleibenden Zeitspanne ab Erkennen der Gefahrensituation, die Wahl des Manövers zur Vermeidung des Unfalls keine Auswirkungen mehr auf die Kollision hat. So ist trotz der relativ geringen Geschwindigkeit nicht nur der Bremsweg zu lange, um vor dem Kind zu halten, sondern es bleibt auch zu wenig Zeit, um die Ausweichtrajektorie soweit auszuführen, dass es zu einer merklichen Richtungsänderung kommt.

Der Unfall war unter den gegebenen Umständen also nicht zu verhindern.

Lässt man die Manövervarianten nach dem Kollisionszeitpunkt zu Ende ausführen, so kann die in Kapitel 2.3.5 dargestellte Theorie beobachtet werden. Es lässt sich nämlich erkennen, dass für kleine Geschwindigkeiten das reine Bremsmanöver weniger Weg benötigt, als das reine Ausweichmanöver. Die Endpositionen nach Beendigung der Manöver sind in Abbildung 5-6 dargestellt.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass deshalb automatisch das Bremsmanöver die bessere Wahl zur Vermeidung oder Verminderung der Unfallschwere darstellt. Wie aus Abbildung 2-16 ersichtlich, die bereits auf Seite 29 dargestellt wurde, spielt auch der geforderte Seitenversatz eine entscheidende Rolle.

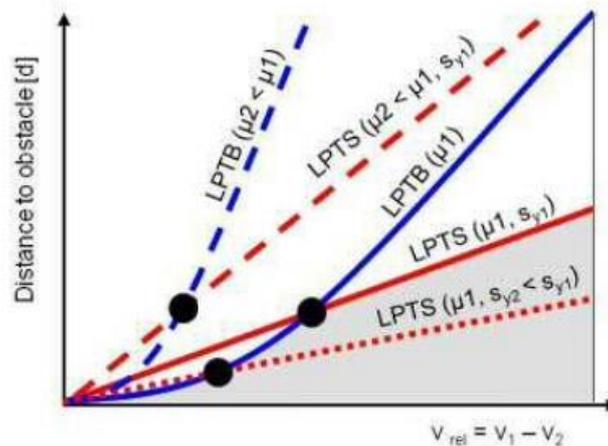


Abbildung 2-16: Unfallvermeidung durch Bremsen und Lenken [28]

Bewegt sich die Person mit einer geringeren Geschwindigkeit in die Fahrlinie des Fahrzeuges, so wird sich die Kontaktstelle an der Fahrzeugfront weiter in jene Richtung verschieben, aus der die Person kommt, da diese nun einen geringeren Weg zurücklegt. Der Unfall kann dadurch bereits mit einem geringeren Seitenversatz bei der Durchführung des Ausweichmanövers verhindert werden. Dies führt laut Abbildung 2-16 dazu, dass sich der Grenzpunkt, an dem es zum Wechsel kommt welches Manöver das Idealere ist, weiter nach links wandert. Das bedeutet, dass das Ausweichmanöver dann bereits bei geringeren Geschwindigkeiten besser als das Bremsmanöver geeignet ist.

### **5.1.2.1 Diskussion des Fahrermodells im Anwendungsfall des ausgewählten Realunfalls**

Betrachtet man den Anwendungsfall des Realunfalls, so kann festgestellt werden, dass sich das Fahrermodell hier ohne Vorbehalt oder Einschränkungen gut anwenden lässt.

Die Studie, welche die Grundlage für den im Modell implementierten Entscheider bildet, behandelt ähnliche Verkehrsgeschehnisse wie in diesem Szenario vorliegen. Somit kann angenommen werden, dass die Entscheidungswahl die Realität sehr gut widerspiegelt.

Da im zweiten Szenario ein Realunfall nachgestellt werden sollte, um die praxisnähe des Modells überprüfen zu können, wurde ein Unfall aus der institutseigenen Unfalldatenbank ZEDATU ausgewählt. Dabei standen jedoch unter Berücksichtigung der geforderten Randbedingungen des Fahrermodells nur Unfälle zur Auswahl, die sich nicht mehr vermeiden ließen.

Vergleicht man in diesem Szenario die unterschiedlichen Manöver fällt auf, dass generell zu wenig Zeit bleibt, um große Auswirkungen der Manöverauswahl feststellen zu können. Das bedeutet, dass in diesem Szenario die Manöverauswahl keine großen Auswirkungen auf den Unfallausgang hatte.

## **5.2 Schlussfolgerung**

Anhand der beiden in Kapitel 5.1 beschriebenen unterschiedlichen Szenarios, auf die das in dieser Masterarbeit entwickelte Fahrermodell angewendet wurde, konnte gezeigt werden, dass sich das Modell grundsätzlich recht gut auf jene Verkehrssituationen anwenden lässt, die die in Kapitel 3.1 definierten Vorgaben und Randbedingungen erfüllen.

Der in diesem Fahrermodell implementierte Entscheider, versucht das menschliche Entscheidungsverhalten in Gefahrensituationen auf Grund von festgestellter Verhaltensmuster und Erkenntnisse aus der Literatur abzubilden. Dabei muss aber erwähnt werden, dass diese Entscheidungswahl hoch komplex ist und durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst wird. Deshalb kann es sein, dass die simulierte Entscheidungswahl im

## Ergebnisse und Diskussion

Modell je nach Verkehrsszenario, das menschliche Verhalten mehr oder weniger exakt nachbildet.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Masterarbeit wurde ein Fahrermodell erstellt mit dem es möglich ist das menschliche Fahrverhalten unter den festgelegten Prämissen abzubilden. Dies kann möglicherweise dazu beitragen das menschliche Fahrverhalten in Zukunft besser zu verstehen und vorhersagen zu können.

Mit diesem Fahrermodell ist es möglich vorhersagen zu treffen, wie sich der Fahrzeuglenker gemäß den implementierten Fahrverhalten in kritischen Verkehrssituationen, die im gültigen Anwendungsbereich des Modells liegen müssen, verhält und reagiert.

Dabei wurde besonders darauf Wert gelegt, dass für das Modell nur ein Mindestmaß an Informationen notwendig sind, um es ausführen zu können. Aus diesem Grund wurden die benötigten Informationen auf 12 Parameter begrenzt. So kann garantiert werden, dass das Modell auch dann ausgeführt werden kann, wenn nicht alle Informationen zum Szenario bis ins Letzte Detail bekannt sind.

Wie schon eingangs erwähnt ist das Führen eines Fahrzeuges eine hoch komplexe Tätigkeit, die sich von vielen unterschiedlichen Parametern mehr oder weniger stark beeinflussen lässt. Aufgrund dieser hohen Komplexität und der Forderung nach einer Anwendbarkeit unter vergleichsweise geringen Informationen, konnten in dieser ersten Arbeit nur Bruchteile der real auftretenden Faktoren berücksichtigt werden und es mussten deshalb eine Vielzahl von Vereinfachungen getroffen werden.

Je nach Interessensgebiet können auf Basis dieses erstellten Grundgerüsts in Zukunft weitere Verbesserungen und Detaillierungen vorgenommen werden.

Im Folgenden sollen einige Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten des Modells dargestellt werden, um die Simulationsqualität zu verbessern bzw. die Aussagefähigkeit des Modells zu erweitern.

Ein erster Schritt dazu wäre es, ein Ausweichmanöver auch nach rechts simulieren zu können. Dazu muss nur die Orientierung der implementierten Ausweichtrajektorie

angepasst werden. Schwieriger wird die Frage zu klären sein, wie man die Entscheidung des Fahrers umsetzt, auf welche Seite er ausweichen soll.

Weiters besteht die Möglichkeit das Fahrermodell so anzupassen, dass es auch für Kurvenfahrten angewendet werden kann. Bis jetzt ist es nur für gerade Straßenabschnitte anwendbar. Hierfür muss die Ausweichtrajektorie angepasst werden, da in diesem Fall die Orientierung des Fahrzeuges am Ende des Ausweichmanövers nicht mehr jener zu Beginn entspricht. Die dazu benötigte Fahrlinie lässt sich gut mit einer gebogenen Sinuslinie nachstellen [18, S. 148].

Im vorgestellten Modell muss der gewählte Seitenversatz manuell vorgegeben werden. Sinnvoll wäre es, wenn das Modell selbstständig erkennen könnte, welcher Seitenversatz gewählt werden muss, um eine Kollision zu verhindern. Dabei sollte auch berücksichtigt werden können, ob dies auf Grund der Umgebungsgegebenheiten möglich ist. So sollte die Fragestellung berücksichtigt werden können, ob aus infrastrukturellen Gründen ein Ausweichmanöver überhaupt möglich ist, oder ob dies durch Vorhandensein von Leitplanken, Mauern oder ähnlichem gar nicht durchgeführt werden kann. Ist dies der Fall, so soll die Auswahl dieses Manövers für dieses Szenario keine oder nur eine untergeordnete Option darstellen.

In diesem Zusammenhang wäre es auch wünschenswert, wenn das Modell selbstständig auf das weitere Verkehrsgeschehen Rücksicht nehmen könnte. Das Ziel sollte es sein das Modell so zu verbessern, dass es eigenständig weitere Verkehrsteilnehmer erkennt und dies in die Entscheidungsauswahl miteinfließen lässt. So wäre es zum Beispiel vorteilhaft, wenn das Modell ein entgegenkommendes Fahrzeug auf der Gegenseite erkennen könnte und auf Grund dessen in diesem Fall ein Ausweichmanöver auf diese Spur mit einer adäquaten Wahrscheinlichkeit als mögliche Verhaltensstrategie in Erwägung zieht.

Ein Verbesserungsvorschlag im Hinblick auf die Simulation eines möglichst realistischen Bremsmanövers liegt in der Betrachtung des Vollbremsmanövers. Im Modell wird, wie auch in der Literatur üblich, von einem idealen Vollbremsmanöver ausgegangen. Das heißt es wird davon ausgegangen, dass der Fahrer im Falle einer Vollbremsung das Bremspedal vollständig

durch drückt und so lange hält, bis das Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist. Die Vollbremsverzögerung wird also mit einem konstanten Wert angenommen.

In der Realität sind viele Bremsungen in Notsituationen im Bezug auf einen kurzen Bremsweg nicht ideal. Nach einer steilen Druckanstiegsphase setzt sich der Druck oft nur zögerlich fort. [34, S. 896]

Eine Verbesserung in der Simulation könnte erzielt werden, wenn dieses reale Bremsverhalten exakter berücksichtigt werden könnte.

Eine weitere das Bremsmanöver betreffende Verbesserung würde darin bestehen, in bestimmten Anwendungsfällen, wie zum Beispiel in Szenarios mit Richtungsverkehr eine Teilbremsung zu ermöglichen. Wie bereits in Kapitel beschrieben, können Situationen auftreten, in denen eine Verzögerung bis zum Stillstand nicht zwingend notwendig ist. Auf diese Weise könnten solche Verkehrssituationen auch realistischer mitberücksichtigt werden.

Unabhängig von den vorgestellten Verbesserungsvorschlägen, kann dieses Fahrermodell zukünftig als Modul in bereits existierende Programme integriert werden, um in späterer Folge die Frage beantwortet zu können, ob in den untersuchten Szenarien und Realunfällen ein Unfall durch ein anderes Fahrverhalten während der Vorkollisionsphase verhindert werden hätte können, oder ob dies nur durch den zusätzlichen Einsatz von Umgebungserfassungssensoren möglich gewesen wäre. Auf diese Weise kann zum Beispiel die Effektivität unterschiedlicher Sensorsysteme im Fahrzeug beurteilt werden und abgeschätzt werden welche Systeme erfolgsversprechend erscheinen.

Mit Hilfe der Verkehrsunfalldatenbank ZEDATU werden reale Unfälle in Österreich erfasst. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Fahrermodell, ist es möglich auch Szenarios und Gefahrenstellen abzubilden, in denen Unfallsituationen gerade noch vermieden werden konnten. Da es in diesen Fällen zu keinem Unfall kam, werden solche Vorkommnisse nicht in der Datenbank erfasst und können aus diesem Grund nicht zur Analyse von Gefahrenstellen herangezogen werden. Mit Hilfe dieses Fahrermodells ist es also unter Umständen auch

möglich Informationen aus solchen Situationen für unterschiedliche Studien zur Verfügung stellen zu können.

Es können mit Hilfe des entwickelten Fahrermodells also auch Aussagen über Beinaheunfälle getroffen werden und so in Zukunft eine Abschätzung gegeben werden wie oft bestimmte untersuchte kritische Situationen vorkommen.

Das Modell würde ebenfalls eine gute Basis bieten, um in Zukunft die Auswirkungen unterschiedlicher verhaltensbeeinflussenden Faktoren auf die Fahrtauglichkeit bewerten zu können. So könnten damit unterschiedliche menschliche Fahrleistungszustände auf Grund des Einflusses von Alkohol, Drogen oder Müdigkeit berücksichtigt werden. Dazu müssten nur die implementierten Parameter des Modells, je nach zu untersuchenden Fall und Auswirkung angepasst werden.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Europäische Kommission, Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Initiative „Intelligentes Fahrzeug“ - „Sensibilisierung für die Bedeutung der IKT für intelligentere, sicherere und sauberere Fahrzeuge“, Bd. KOM(2006) 59 endg. .
- [2] C. Bauer, „A driver specific maneuver prediction model based on fuzzy logic“, Freie Universität Berlin, Germany, 2012.
- [3] M. Plöchl und J. Edelmann, „Driver models in automobile dynamics application“, Veh. Syst. Dyn., Bd. 45, Nr. 7–8, S. 699–741, Juli 2007.
- [4] D. Schramm, M. Hiller, und R. Bardini, „Einleitung“, in Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 1–17.
- [5] J. Rasmussen, „Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models“, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Bd. SMC-13, Nr. 3, S. 257–266, Mai 1983.
- [6] B. Deml, H. Neumann, A. Müller, und H. J. Wünsche, „Implementierung eines Fahrermodells in die Simulationsumgebung eines autonomen Fahrzeugs“, at - Automatisierungstechnik, Schwerpunkt Themenheft: Kognitive Automobile, Neubiberg, 2008.
- [7] S. B. Kraus, „Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme“, Technische Universität München, 2012.
- [8] H. Bubb, „Menschmodelle“, in Automobilergonomie, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 221–258.
- [9] G. Jürgensohn, Fahrermodelle, Bd. 4. Würzburg: Pro Universitate Verlag, 1997.
- [10] T. Lindberg, „Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrassistenzsysteme“, Technische Universität Berlin, 2011.
- [11] H. Bubb, „Das Regelkreisparadigma der Ergonomie“, in Automobilergonomie, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 27–65.
- [12] E. Donges, „Fahrerverhaltensmodelle“, in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 17–26.
- [13] D. Adamski, „Der simulierte Fahrer“, in Simulation in der Fahrwerktechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 225–232.
- [14] L. Saleh, P. Chevrel, F. Mars, J.-F. Lafay, und F. Claveau, „Human-like cybernetic driver model for lane keeping“, gehalten am 18th IFAC World Congress, Milano, 2011, englisch, S. 4368–4373.
- [15] R. A. Hess und A. Modjtahedzadeh, „A control theoretic model of driver steering behavior“, IEEE Control Syst. Mag., Bd. 10, Nr. 5, S. 3–8, Aug. 1990.
- [16] A. Reński, „Identification of driver model parameters.“, Int. J. Occup. Saf. Ergon. JOSE, Bd. 7, Nr. 1, S. 79–90, 2001.
- [17] C. Schmidt, Fahrstrategien zur Unfallvermeidung im Straßenverkehr für Einzel- und Mehrobjektszenarien. KIT Scientific Publishing, 2014.
- [18] W. Gratzer und M. Becke, „Kinematik“, in Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, H. Burg und A. Moser, Hrsg. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, S. 89–169.

## Literaturverzeichnis

- [19] H. Steffan, „Unfallmechanik im Verkehrswesen“, Graz, 2012.
- [20] Kraftfahrtechnisches Taschenbuch | Robert Bosch GmbH | Springer. .
- [21] M. Powelleit, E. Muhrer, M. Vollrath, R. Henze, L. Liesner, und T. Pawellek, Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver, Bd. F 100. 2015.
- [22] K.-H. Schimmelpfennig und U. Nackenhorst, „Bedeutung der Querbesehleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers“, in Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Bd. 23, S. 94–96.
- [23] A. S. Cohen, „Informationsaufnahme beim Kraftfahrer“, in Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, H. Burg und A. Moser, Hrsg. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, S. 217–250.
- [24] B. Abendroth, K. Landau, und J. Weiße, „Menschliche Anforderungen“, in Bremsenhandbuch, B. Breuer und K. H. Bill, Hrsg. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 51–64.
- [25] M. Burckhardt, Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen. Verlag TÜV Rheinland, 1985.
- [26] K.-D. Brösdorf, H. Burg, A. Moser, und M. Martinsohn, „Pkw-Pkw-Unfälle“, in Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, H. Burg und A. Moser, Hrsg. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, S. 411–437.
- [27] C. Y. Warner, G. C. Smith, M. B. James, und G. J. Germane, „Friction Applications in Accident Reconstruction“, SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 830612, Feb. 1983.
- [28] A. Eckert, B. Hartmann, M. Sevenich, und P. E. Rieth, „Emergency steer & brake assist - A systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems“, Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), 2011.
- [29] L. D. Adams, „Review of literature on obstacle avoidance maneuvers: braking versus steering“, University of Michigan, UMTRI-94-19, Aug. 1994.
- [30] D. McGehee, E. Mazzae, G. H. Baldwin, P. Grant, C. Simmons, J. Hankey, und G. Forkenbrock, „Examination of Drivers' Collision Avoidance Behavior Using Conventional and Antilock Brake Systems on the Iowa Driving Simulator“, Hum. Factors Veh. Saf. Res., Juni 1999.
- [31] D. Lechner und G. Malatarre, „Emergency maneuver experimentation using a driving simulator (SAE Report No 910016)“, gehalten auf der Autotechnologies 5th Conference and Exposition, Monte Carlo, 1991.
- [32] M. Trzesniowski, „Lenkung Steering“, in Rennwagentechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 465–514.
- [33] H. Yoshida, T. Sugitani, M. Ohta, J. Kizaki, A. Yamamotoz, und K. Shirai, „Development of the Brake Assist System“, SAE Technical Paper, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 980601, Feb. 1998.
- [34] H. Winner, „Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen“, in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, Hrsg. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 893–912.

## 8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Zusammenhang Fahrer, Fahrzeug, Umgebung .....	6
Abbildung 2-2: Mögliche Einteilung der Fahrermodelle nach [7] und [2] .....	8
Abbildung 2-3: vereinfachtes Regelkreisbild (vgl. [11, S. 29]).....	9
Abbildung 2-4: Zweiebenenmodell der Lenkregelung [13, S. 230] .....	10
Abbildung 2-5: Prinzipieller Aufbau ACT-R (vgl. [2]) .....	11
Abbildung 2-6: Spurführungsmodell nach Saleh [14].....	14
Abbildung 2-7: Fahrermodell nach Hess [15].....	15
Abbildung 2-8: Graphische Darstellung des Lenkgesetzes [16] .....	16
Abbildung 2-9: Blockdiagramm des Lenkmodells nach Renski [16] .....	16
Abbildung 2-10: Winkelbeziehungen.....	17
Abbildung 2-11: Aufbau der Ausweichtrajektorie[18, S. 145] .....	19
Abbildung 2-12: Abhängigkeit der Geschwindigkeit.....	21
Abbildung 2-13: Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse.....	22
Abbildung 2-14: Maximale Querschleunigung bei Spurwechselmanöver [22] .....	24
Abbildung 2-15: Phasen und Verzögerungsverlauf während des Bremsvorgangs (vgl. [23, S. 237],[24, S. 54]) ...	25
Abbildung 2-16: Unfallvermeidung durch Bremsen und Lenken [28] .....	29
Abbildung 2-17: Versuchsaufbau der Unfallvermeidungsstudie [28] .....	31
Abbildung 2-18: Daten aus Unfallvermeidungsstudie [28].....	32
Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau des Fahrermodells.....	36
Abbildung 3-2 Aufbau des Lenkmodells.....	39
Abbildung 3-3: Berücksichtigung der Vorausschauzeit $L_a$ für die Ausweichtrajektorie.....	42
Abbildung 3-4: Aufbau des Ausweichmodells.....	43
Abbildung 3-5: Aufbau des Bremsmodells .....	44
Abbildung 3-6: Verzögerungsverlauf während Bremsmanöver .....	45
Abbildung 3-7: Aufbau des Kombinationsmodells .....	46
Abbildung 3-8: Änderung der Lenkwinkelverstärkung $W$ .....	52
Abbildung 3-9: Änderung der Vorauschaulistanz $L_a$ .....	53
Abbildung 3-10: Ergebnis automatische Parameteranpassung 30 km/h.....	56
Abbildung 3-11: Ergebnis automatische Parameteranpassung 80 km/h.....	57
Abbildung 4-1: Flowchart des Fahrermodells .....	58
Abbildung 5-1: Szenario zu Beginn der Simulation .....	71
Abbildung 5-2: Szenario erfordert Reaktion des Ego-Fahrzeugs .....	71
Abbildung 5-3: Fahrzeugumrisslinien bei der Manöverausrührung des generisch erstellten Szenarios .....	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-4: Zeitpunkt an dem das Kind wahrgenommen wird. .... 75

Abbildung 5-5: Auftauchen des Kindes aus der Fahrerperspektive ..... 75

Abbildung 5-6: Fahrzeugumrisslinien bei der Manöverausführung des ausgewählten Realunfalls ..... 76

## 9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Benötigter Weg in Meter für einen Seitenversatz von 3 m [18, S. 147] .....	22
Tabelle 2-2: Zeitangaben für Teilbereiche der Reaktionsphase[18, S. 126] .....	26
Tabelle 2-3: Bremsverzögerungswerte in Abhängigkeit der Witterung .....	28
Tabelle 3-1: Gültigkeitsbereiche für auftretende TTC-Werte .....	48
Tabelle 3-2: Parameter des Fahrermodells .....	50
Tabelle 3-3: Ausgewählter Wertebereich für Parameteranpassung .....	55

## 10. FORMELVERZEICHNIS

Formel (2-1): Lenkradwinkel nach <i>Renski</i> .....	16
Formel (2-2): Lenkradwinkel nach <i>Renski</i> zweite Darstellung .....	17
Formel (2-3): Winkelbeziehung .....	17
Formel (2-4): Beziehung des <i>Sichtwinkels</i> $\epsilon$ .....	18
Formel (2-5): Beziehung <i>Winkel</i> $\alpha$ .....	18
Formel (2-6): Vereinfachung für kleine Winkeländerung .....	18
Formel (2-7): Formel für den <i>Sichtwinkel</i> $\epsilon$ .....	18
Formel (2-8): Gleichung der schrägen Sinuslinie .....	20
Formel (2-9): Quadratische Gleichung zur Bestimmung der <i>erforderlichen Länge</i> $L$ .....	20
Formel (2-10): Formel für die <i>Querbeschleunigung</i> $a_q$ .....	21
Formel (3-1): Auslösebedingung .....	36
Formel (3-2): Zusammenhang <i>Radlenkwinkel</i> $\delta A$ und <i>Lenkübersetzung</i> $i_S$ .....	40
Formel (3-3): Ackermann Bedingung .....	41
Formel (3-4): Umrechnung kurvenäußeres Rad auf kurveninneres Rad .....	41
Formel (3-5): Gleichung der schrägen Sinuslinie zeitabhängig .....	41
Formel (3-6): Gleichung der schrägen Sinuslinie um <i>Vorrausschaulänge</i> $L_a$ versetzt .....	41
Formel (3-7): Formel zur Bestimmung tatsächliche maximal ausgeführte Vollbremsverzögerung .....	46
Formel (3-8): Berechnung der Abweichung der Trajektorien .....	54
Formel (3-9): Bestimmung des Mittelwerts der betrachteten Punkte .....	54



# ANHANG

## A1. Das Fahrermodell

```

%-----Fahrermodell-----
clear all
%-----Parameter-----
v1=28/3.6;           % Geschwindigkeit Fahrzeug1 [m/s]
my=0.6;             % Reibungskoeffizient Straße-Reifen [-]
                    % (tr0.8, nass0.45, schnee0.15, eis0.05)
f=1;               % Vollbremsfaktor [-]
iS=15;             % Lenkübersetzung [-] (PCC standardmäßig 15)
Sv=2;              % Zieloffset (Ausweichversatz) [m]
tRD=0.69;          % Reaktionsdauer [s]
                    % (Reaktionsgrundzeit, Umsetzzeit, Ansprechzeit)
Tk=0.57;           % Reaktionszeit(Zeitverzögerung) [s]
TTC=1.2;           % time to collision - Reaktionspunkt [s]

La=4;              % Vorausschaupunkt [m]
W=18;              % Lenkwinkelverstärkung [-]

Blickabwendung=0;  % 1 -Objekt außer Blickfeld, 0 -Objekt im Blickfeld
v2=6/3.6;          % Geschwindigkeit des Hindernisses [m/s]

%-----interne Berechnungsparameter und Angaben-----
aB=my*9.81;        % maximale Bremsverzögerung [m/s^2]
aBr=aB*f;          % tatsächliche Vollbremsverzögerung [m/s^2]
aq=2;              % Quereschleunigung [m/s^2]
                    % ist aB (wegen my) kleiner -> schleudern

dt=0.015;          % Simulations-Zeitschritt [s]

if v1>100/3.6 || my<=0.45
    tS=0.4;         % Bremschwellphase [s]
else
    tS=0.2;         % Bremschwellphase [s]
end
tBZ=0.48;          % Blickzuwendungszeit [s]

aS=aBr/2;          % Bremsverzögerung während Schwellphase [m/s^2]
vA=v1;             % Anfangsgeschwindigkeit [m/s]
vE=0;              % Endgeschwindigkeit nach Vollbremsung [m/s]
vB=vA-tS*aS;       % Geschwindigkeit nach Schwellphase [m/s]
sB=(vB^2-vE^2)/(2*aBr); % Weg in Vollbremsphase [m]

```

```

if Blickabwendung==true
    tR=abs(tRD)+abs(tBZ);
    Tk=abs(Tk)+abs(tBZ);
else
    tR=abs(tRD);
    Tk=abs(Tk);
end

tB=(vB-vE)/aBr;           % Zeit in Vollbremsphase [s]
tA=tR+tS+tB;             % Anhaltezeit [s]

sR=v1*tR;                % Zurückgelegter Weg in Reaktionsphase [m]
sS=v1*tS+0.5*aS*tS^2;    % Zurückgelegter Weg in Schwellphase [m]
sges=sR+sS+sB;          % Anhalteweg [m]

syms L
A = L^4 + sv*L^2 - (2*pi*sv*v1^2/aa)^2;
L1 = solve(A,'L');
L2 = L1(1);
L3=double(L2);          % benötigte Länge der Ausweichtrajektorie in x [m]

PCC = actxserver('PCCrash.Document');
filename = '\\129.27.213.85\vs1-
p\050_Theses\050_MSC\15_MSC_Lang\060_Temp\Matlab\OLE\PCCScene116F.pro';
invoke(PCC,'OpenDocument',filename);

invoke(PCC,'Execute','[NEWSIM]');
invoke(PCC,'Execute','[STARTPOS]');
v1=v1*3.6; % Geschwindigkeit Fahrzeug1 [km/h]
v2=v2*3.6; % Geschwindigkeit Hindernis [km/h]

invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,298,v1); % Geschwindigkeit1 [km/h]
invoke(PCC,'SetParameterDouble',1,298,v2); % Geschwindigkeit2 [km/h]
invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,149,my); % Reibungskoeff.
invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,155,0); % x-Koordinate COG [m]
invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,156,0); % y-Koordinate COG [m]

xges=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,155); % x-Abstand am Beginn [m]
b1=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,501); % Breite Fahrzeug1 [m]
b2=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,501); % Breite Hindernis [m]

invoke(PCC,'Execute','[STARTPOS]');
invoke(PCC,'Execute','[NEWSIM]');

y2s=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,156); % yPos Hindernis zu Beginn [m]

or1=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,296); % Orientierung [°]
or2=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,296); % Orientierung [°]

dir=abs(abs(or1)-abs(or2)); % Ausrichtung zueinander [°]

v2y=v2*cos(or2); % Geschwindigkeit Hindernis y-Komponente [m/s]

```

```

v2x=v2*sin(or2);           % Geschwindigkeit Hindernis x-Komponente [m/s]

xax1=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,503); % Abstand Schwerpkt-Achse1 [m]
xfr1=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,505); % Abstand Achse1-Front [m]
xax2=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,503); % Abstand Schwerpkt-Achse1 [m]
xfr2=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,505); % Abstand Achse1-Front [m]
length2=invoke(PCC,'GetParameterDouble',1,500);% Länge Hindernis [m]

xs1=xax1+xfr1;             % Abstand Schwerpkt-Front [m]
xs2=xax2+xfr2;           % Abstand Schwerpkt-Front [m]

if dir>=90
    xgesR=xges-(xs1+xs2);
    tc=xgesR/(abs(v1)+abs(v2x));
else
    xgesR=xges-(length2-(xax2+xfr2))-xs1;
    tc=xgesR/(abs(v1)-abs(v2x));
end

t1=tc; % Kollisionszeit [s]
t2=tc; % Kollisionszeit [s]

ta=L3/v1+Tk; % benötigte Zeit zum Durchfahren der Ausweichtrajektorie [s]

%-----Überdeckung-----
yk=v2y*t2; % yPos im Kollisionspunkt [m]

op=y2s+yk; % Überdeckungskpunkt in y [m]
ol=0.5-((0.5-1)/(0-b1)*(0-op)); % Überdeckungsgrad [-]

if ol>0.5
    overlap=1;
elseif ol<=0.5
    overlap=0.5;
end

if overlap==0.5 && TTC~2
    overlap=1;
end

%----Entscheidungsstatus-----
Lenken=0;
Bremsen=0;
Kombi=0;

run Entscheider.m

%-----Entscheidungsvarianten-----

%----Entscheidungsvariante Lenken----

```

```

if Lenken==1 && Bremsen==0 && Kombi==0

    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,27,10,11); %Aktivierung der Lenksequenz

    psirad2 = invoke(PCC,'GetState',1,3);  %(3) COG vel dir [rad]
    y0s2 = invoke(PCC,'GetState',1,1);     %(1) - COG y position [m]
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,30,10,0); %Lenkung linkes Vorderrad
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,34,10,0); %Lenkung rechtes Vorderrad

    Flag1=true;
    tt=0;

    while (true)

        if tc<=TTC && Flag1

            run Lenkmodell.m
            break
        else

            psirad = invoke(PCC,'GetState',0,3);  %(3) COG vel dir [rad]
            y0s = invoke(PCC,'GetState',0,1);     %(1) - COG y position [m]

            invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0); %Lenkung Rad VL (30)
            invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0); %Lenkung Rad VR (34)
            invoke(PCC,'SimForward_1');

        end

        tc=tc-0.015;
        tt=tt+0.015;
    end
end

%-----Entscheidungsvariante Bremsen-----
if Bremsen==1 && Lenken==0 && Kombi==0

    tt=0;
    tZ=0;
    xt1=v1*tt;
    xt2=v2*tt;
    xc=xgesR-xt1-xt2-tA*v2;

    Flag2=true;

    while (true)

        if tc<=TTC && Flag2

            run Bremsmodell.m
            break
        end
    end
end

```

```

else
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0); %Lenkung Rad VL (30)
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0); %Lenkung Rad VR (34)
    invoke(PCC,'SimForward_1');

end

tc=tc-0.015;
tt=tt+0.015;
xt1=v1*tt;
xt2=v2*tt;
xc=xgesR-xt1-xt2-tA*v2;
end
end

%-----Entscheidungsvariante Kombination-----
if Kombi==1 && Lenken==0 && Bremsen==0

    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,27,10,11); %Aktivierung der Lenksequenz

    psirad2 = invoke(PCC,'GetState',1,3); % (3) COG vel dir [rad]
    y0s2 = invoke(PCC,'GetState',1,1); % (1) - COG y position [m]
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,30,10,0); %Lenkung Rad VL (30)
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,34,10,0); %Lenkung Rad VR (34)

    Flag1=true;
    tt=0;

    while (true)

        if tc<=TTC && Flag1
            run Kombinationsmodell.m
            break
        else

            psirad = invoke(PCC,'GetState',0,3); % (3) COG vel dir [rad]
            y0s = invoke(PCC,'GetState',0,1); % (1) - COG y position [m]
            invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0); %Lenkung Rad VL (30)
            invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0); %Lenkung Rad VR (34)
            invoke(PCC,'SimForward_1');

        end

        tc=tc-0.015;
        tt=tt+0.015;

    end
end

if Bremsen==0 && Lenken==0 && Kombi==0
    error('Keine Entscheidung getroffen!')
end

```

```
end  
  
if Bremsen+Lenken+Kombi>1  
    errordlg('Ungültige Entscheidung!')  
end
```

*Published with MATLAB® R2014a*

## A2. Der Entscheider

```

%-----Entscheider-----

if TTC>=2.25 && overlap==1
    wskB=0.72;           % Wahrscheinlichkeit Bremsen
    wskS=0.14;         % Wahrscheinlichkeit Steuern
    wskK=0.14;         % Wahrscheinlichkeit Kombination
end

if TTC>1.75 && TTC<2.25 && overlap==1
    wskB=0.46;         % Wahrscheinlichkeit Bremsen
    wskS=0.16;         % Wahrscheinlichkeit Steuern
    wskK=0.38;         % Wahrscheinlichkeit Kombination
end

if TTC==2 && overlap==0.5
    wskB=0.38;         % Wahrscheinlichkeit Bremsen
    wskS=0.39;         % Wahrscheinlichkeit Steuern
    wskK=0.23;         % Wahrscheinlichkeit Kombination
end

if TTC<=1.75 && overlap==1
    wskB=0.43;         % Wahrscheinlichkeit Bremsen
    wskS=0;            % Wahrscheinlichkeit Steuern
    wskK=0.57;         % Wahrscheinlichkeit Kombination
end

w1 = rand(1,1);

if w1<=wskB
    Bremsen=1;

elseif w1>wskB && w1<=wskB+wskS
    Lenken=1;

elseif w1>wskB+wskS
    Kombi=1;

end

```

Published with MATLAB® R2014a

### A3. Das Lenkmodell

```

%-----Lenkmodell-----
%-----Parameter-----
v=v1;
lr=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,303);    % Radstand [m]
bp=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,514);    % Spurweite [m]

%-----Berechnung von yd (gewünschte Wegabweichung von x-Achse)-----
dt=0.015; % Simulationszeitschritt [s]

t=0:dt:L3/v+La/v+Tk+3;
yd=sv*(v*(t-La/v)/L3 - (1/(2*pi))*sin((2*pi*v*(t-La/v))/L3));
yd(yd>sv)=sv;
yd(yd<0)=0;

%----- Gierwinkel (psi)-----
% %-----Sensor-----
Flag=true; % Auslöser

n=round(La/v/dt); % Änderung Reaktionszeit ändert nichts an Vorausschauzeit

m=1;

sTk=v*Tk;
tTk=0;
tT=0;
tT0=tT;

while tTk<Tk

    psirad(m) = invoke(PCC,'GetState',0,3); % (3) COG vel dir [rad]
    y0s(m) = invoke(PCC,'GetState',0,1); % (1) COG y position [m]
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0); % Lenkung Rad VL (30)
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0); % Lenkung Rad VR (34)
    invoke(PCC,'SimForward_1');
    tTk=tTk+0.015;
    m=m+1;
end

while (true)

    if tTk>=Tk
        tw(m)=tT;
    end
end
    
```

```

psirad = invoke(PCC,'GetState',0,3);  %(3) COG vel dir [rad]
psi=psirad*180/pi;                    %Gierwinkel

%-----laterale Wegabweichung (tatsächliche lat. Position)-----
y0s(m) = invoke(PCC,'GetState',0,1);  %(1) - COG y position [m]

%-----Lenkwinkel-----
deltaL(m)=(W/La*yd(n)-W/La*y0s(m)-W*psirad)*180/pi;

%-----
deltaImax=50;                          % max möglicher Einschlagwinkel Rad
deltaImaxrad=deltaImax*pi/180;

deltaAmaxrad=atan(tan(deltaImaxrad)./(1+bp/lr*tan(abs(deltaImaxrad))));
deltaAmax=deltaAmaxrad*180/pi;
deltaLmax=deltaAmax*is;  % max möglicher Lenkradwinkel
%-----

if deltaL(m)>deltaLmax
    deltaLkontrolle(m)=1;
    deltaL(m)=deltaLmax;

elseif deltaL(m)<=deltaLmax && deltaL(m)>=-deltaLmax
    deltaLkontrolle(m)=0;

elseif deltaL(m)<-deltaLmax
    deltaLkontrolle(m)=1;
    deltaL(m)=-deltaLmax;
end

deltaA=deltaL(m)/is;                    % äußerer Radlenkwinkel [°]
deltaArad=deltaA*pi/180;                % äußerer Radlenkwinkel [rad]

deltaIrad=atan(tan(deltaArad)./(1-bp/lr*tan(abs(deltaArad))));
% innerer Radlenkwinkel [rad]
deltaI=deltaIrad*180/pi;                % innerer Radlenkwinkel [°]

if deltaL<0                            %Rechtskurve
    deltaLinkesRad=deltaA;
    deltaRechtesRad=deltaI;
else                                    %Linkskurve
    deltaLinkesRad=deltaI;
    deltaRechtesRad=deltaA;
end

invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,deltaLinkesRad);
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,deltaRechtesRad);

```

```

        invoke(PCC,'SimForward_1'); %0.015s pro Simulationsschritt

%----Fehler berechnen-----
        if m>round(Tk/dt)

                fehler_y=abs (y0s (m)-yd(m));
        else
                fehler_y=0;
        end

        vektor(m)=fehler_y;

    end

    if tw(m)>tT0+La/v+L3/v                % Abbruchbedingung
        break
    end

    n=n+1;
    tT=tT+0.015;
    tTk=tTk+0.015;
    m=m+1;
end

if sum(deltaKontrolle)>0
    error('Maximal möglicher Einschlagwinkel überschritten!')
end

b=ones (1,m);
b(m-round(m/3)+1:end)=2;

vekgew=vektor.*b;
fehler=sum(vektor)/m;
fehlergew=sum(vekgew)/m;

textF=['mittlere y-Abweichung = ',num2str(fehler),'m'];
textFgew=['gewichtete Abweichung = ',num2str(fehlergew)];
textv=['v = ',num2str(v),'m/s'];
textw=['w = ',num2str(w)];
textLa=['La = ',num2str(La),'m'];
textTk=['Tk = ',num2str(Tk),'s'];
disp(textv)
disp(textw)
disp(textLa)
disp(textTk)
disp(textF)
disp(textFgew)

```

*Published with MATLAB® R2014a*

## A4. Das Bremsmodell

```
%-----Bremsmodell-----  
  
a1=-abs(aBr);  
  
while tZ<=tR  
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0);           %Lenkung Rad VL (30)  
    invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0);           %Lenkung Rad VR (34)  
    invoke(PCC,'SimForward_1');  
    tZ=tZ+0.015;  
end  
  
while tZ>tR && tZ<=tR+tS  
    invoke(PCC,'SetSeqBrakingAccIntensity',0,3,-aS);  
    invoke(PCC,'SimForward_1');  
    tZ=tZ+0.015;  
end  
  
while tZ>tR+tS && tZ<=tA  
    invoke(PCC,'SetSeqBrakingAccIntensity',0,3,a1);  
    invoke(PCC,'SimForward_1');  
    tZ=tZ+0.015;  
end  
  
break
```

*Published with MATLAB® R2014a*

## A5. Das Kombinationsmodell

```

%-----Kombinationsmodell-----
a1=-abs(aB);
v=v1;

tt=0;
tZ=0;
xt1=v1*tt;
xt2=v2*tt;
xc=xgesR-xt1-xt2-tA*v2;

Flag2=true;

invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,27,10,11); %Aktivierung der Lenksequenz

psirad2 = invoke(PCC,'GetState',1,3); % (3) COG velocity direction [rad]
y0s2 = invoke(PCC,'GetState',1,1); % (1) - COG y position [m]
invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,30,10,0); %Lenkung Rad VL (30)
invoke(PCC,'SetSequenceVal',1,3,34,10,0); %Lenkung Rad VR (34)

Flag1=true;
tt=0;

lr=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,303); % Radstand [m]
bp=invoke(PCC,'GetParameterDouble',0,514); % Spurweite [m]

t=0:dt:L3/v1+La/v1+Tk+3;
yd=sv*(v1*(t-La/v1)/L3 - (1/(2*pi))*sin((2*pi*v1*(t-La/v1))/L3));
yd(yd>sv)=sv;
yd(yd<0)=0;

%----- Gierwinkel (psi)-----
Flag=true; %Auslöser

n=round(La/v1/dt); %Änderung Reaktionszeit ändert nichts an Vorausschauzeit

m=1;

sTk=v1*Tk;
tTk=0;
tT=0;
tT0=tT;

while tTk<Tk

    psirad(m) = invoke(PCC,'GetState',0,3); % (3) COG vel dir [rad]

```

```

y0s(m) = invoke(PCC,'GetState',0,1);    %(1) COG y position [m]
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,0);    %Lenkung Rad VL (30)
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,0);    %Lenkung Rad VR (34)
invoke(PCC,'SimForward_1');
tTk=tTk+0.015;
m=m+1;
end

while (true)

    if tTk>=Tk && Flag
        tw(m)=tT;

        %-----Gierwinkel (psi)-----
        psirad = invoke(PCC,'GetState',0,3);    %(3) COG vel dir [rad]
        psi=psirad*180/pi;                    %Gierwinkel

        %-----laterale Wegabweichung (tatsächliche lat. Position)-----

        y0s(m) = invoke(PCC,'GetState',0,1);    %(1) COG y position [m]

        %-----Lenkwinkel-----

        deltaL(m)=(W/La*yd(n)-W/La*y0s(m)-W*psirad)*180/pi;

        %-----
        deltaImax=50;                % max möglicher Einschlagwinkel Rad
        deltaImaxrad=deltaImax*pi/180;

        deltaAmaxrad=atan(tan(deltaImaxrad)./(1+bp/lr*tan(abs(deltaImaxrad))));
        deltaAmax=deltaAmaxrad*180/pi;
        deltaLmax=deltaAmax*is;    % max möglicher Lenkradwinkel
        %-----

        if deltaL(m)>deltaLmax
            deltaLkontrolle(m)=1;
            deltaL(m)=deltaLmax;

        elseif deltaL(m)<=deltaLmax && deltaL(m)>=-deltaLmax
            deltaLkontrolle(m)=0;

        elseif deltaL(m)<-deltaLmax
            deltaLkontrolle(m)=1;
            deltaL(m)=-deltaLmax;
        end

        deltaA=deltaL(m)/is;        % äußerer Radlenkwinkel [°]
        deltaArad=deltaA*pi/180;    % äußerer Radlenkwinkel [rad]

        deltaIrad=atan(tan(deltaArad)./(1-bp/lr*tan(abs(deltaArad))));
                                    % innerer Radlenkwinkel [rad]

```

```
deltaI=deltaIrad*180/pi; % innerer Radlenkwinkel [°]

if deltaL<0 %Rechtskurve
    deltaLinkesRad=deltaA;
    deltaRechtesRad=deltaI;
else %Linkskurve
    deltaLinkesRad=deltaI;
    deltaRechtesRad=deltaA;
end

invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,deltaLinkesRad);
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,deltaRechtesRad);

if tZ>tR-Tk && tZ<=tR-Tk+tS
    invoke(PCC,'SetSeqBrakingAccIntensity',0,3,-a5);
end

if tZ>tR-Tk+tS && tZ<=tA
    invoke(PCC,'SetSeqBrakingAccIntensity',0,3,a1);
end
invoke(PCC,'SimForward_1'); %0.015s pro Simulationsschritt

end

if tw(m)>tT0+La/v1+L3/v1
    break
end

n=n+1;
tT=tT+0.015;
m=m+1;
tZ=tZ+0.015;
end
```

*Published with MATLAB® R2014a*

## A6. Die Parameteranpassung

```

%-----Parameteranpassung-----
clear all
%-----fixe Parameter-----
v=30/3.6; % Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
sv=2; % Zieloffset (Ausweichversatz) [m]
my=0.8; % Reibungskoeffizient Straße-Reifen [-]
lr=2.04; % Radstand [m]
bp=1.24; % Spurweite [m]
aq=2; % Querbefschleunigung [m/s^2]
tk=0.57; % Reaktionszeit(Zeitverzögerung) [s]
is=15; % Lenkradübersetzung (PCC rechnet standardmäßig mit 15)

%-----anzupassende Parameter-----
W=10;%[1:1:60]; %Lenkwinkelfaktor(steering angle gain) [-]
La=3;%[1:1:50]; %Vorausschaupunkt [m]

PCC = actxserver('PCCrash.Document');
filename = '\\129.27.213.85\vsip\050_Theses\050_MSC\15_MSC_Lang\060_Temp\Matlab\OLE\testPCC1.pro';
invoke(PCC,'OpenDocument',filename);

invoke(PCC,'Execute','[NEWSIM]');
invoke(PCC,'Execute','[STARTPOS]');
v1=v*3.6; %[km/h]

invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,298,v1); %Laden der Geschwindigkeit
invoke(PCC,'SetParameterDouble',0,220,0);

invoke(PCC,'Execute','[STARTPOS]');
invoke(PCC,'Execute','[NEWSIM]');
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,27,10,11); %Aktivierung der Lenksequenz

counter=1;
for i=1:length(W)
    for j=1:length(La)

%-----Berechnung von yd (gewünschte Wegabweichung von x-Achse)-----
        dt=0.015; %Simulationszeitschritt [s]

        syms L
        A = LA^4 + Sv*LA^2 - (2*pi*Sv*v^2/aq)^2;
        L1 = solve(A,'L');
        L2 = L1(1);
        L3=double(L2);
    end
end

```

```

t=0:dt:L3/v+La(j)/v+Tk+2;

yd=sv*(v*(t-La(j)/v)/L3 - (1/(2*pi))*sin((2*pi*v*(t-La(j)/v))/L3));
yd(yd>sv)=sv;
yd(yd<0)=0;

%----- Gierwinkel (psi)-----

invoke(PCC,'Execute','[STARTPOS]');

Flag=true; %Auslöser
n=round(La(j)/v/dt);
m=1;

sTk=v*Tk;
tTk=0;
tT=0;
tT0=tT;

while tTk<Tk
    tTk=tTk+0.015;
    m=m+1;
end

while (true) %unendliche Schleife
    if tTk>=Tk
        tw(m)=tT;

        psirad = invoke(PCC,'GetState',0,3); % (3) COG vel dir [rad]
        psi=psirad*180/pi; % Gierwinkel

        %-----laterale Wegabweichung (tatsächliche lat. Position)-----
        y0s(m) = invoke(PCC,'GetState',0,1); % (1) COG y position [m]

        %-----Lenkwinkel-----

        deltaL(m)=(W(i)/La(j)*yd(n)-W(i)/La(j)*y0s(m)-W(i)*psirad)*180/pi;

        %-----
        deltaImax=50; % max möglicher Einschlagwinkel Rad
        deltaImaxrad=deltaImax*pi/180;

        deltaAmaxrad=atan(tan(deltaImaxrad)./(1+bp/lr*tan(abs(deltaImaxrad))));
        deltaAmax=deltaAmaxrad*180/pi;
        deltaLmax=deltaAmax*is; % max möglicher Lenkradwinkel
        %-----

        if deltaL(m)>deltaLmax

```

```

        deltaLKontrolle(m)=1;
        deltaL(m)=deltaLmax;

elseif deltaL(m)<=deltaLmax && deltaL(m)>=-deltaLmax
    deltaLKontrolle(m)=0;

elseif deltaL(m)<-deltaLmax
    deltaLKontrolle(m)=1;
    deltaL(m)=-deltaLmax;
end

deltaA=deltaL(m)/lS;           % äußerer Radlenkwinkel [°]
deltaArad=deltaA*pi/180;      % äußerer Radlenkwinkel [rad]

deltaIrad=atan(tan(deltaArad)./(1-bp/lr*tan(abs(deltaArad))));
                                % innerer Radlenkwinkel [rad]
deltaI=deltaIrad*180/pi;      % innerer Radlenkwinkel [°]

    if deltaL<0                %Rechtskurve
        deltaLinkesRad=deltaA;
        deltaRechtesRad=deltaI;
    else                        %Linkskurve
        deltaLinkesRad=deltaI;
        deltaRechtesRad=deltaA;
    end

invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,30,10,deltaLinkesRad);
invoke(PCC,'SetSequenceVal',0,3,34,10,deltaRechtesRad);

invoke(PCC,'SimForward_1');

%----Fehler berechnen----
    if m>round(Tk/dt)
        fehler_y=abs(y0s(m)-yd(m));
    else
        fehler_y=0;
    end

vektor(m)=fehler_y;
end

    if tw(m)>tT0+La/v+L3/v      % Abbruchbedingung
        break
    end

n=n+1;
tT=tT+0.015;
tTk=tTk+0.015;
m=m+1;

```

```

end
%-----
Kontrolle(i,j)=sum(deltaLKontrolle);

if Kontrolle(i,j)<1
    KontrolleLogic(i,j)=1;
else
    KontrolleLogic(i,j)=NaN;
end

%-----
b=ones(1,m);
b(m-round(m/3)+1:end)=2;

vekgew=vektor.*b;
fehler(i,j)=sum(vektor)/m;
fehlergew(i,j)=sum(vekgew)/m;

counter=counter+1;
vektor=0;
end
end
fehlergewKont=fehlergew.*KontrolleLogic;

[minF,I] = min(fehlergewKont(:));
[I_row, I_col] = ind2sub(size(fehlergewKont),I);

if isnan(minF)==1
    error('Für den angegebenen Wertebereich wurden keine sinnvollen
Parameter gefunden!')
    minW=NaN;
    minLa=NaN;
else
    minW=W(I_row);
    minLa=La(I_col);
end

text6=['geringste Abweichung = ',num2str(minF)];
textFgew=['gewichtete Abweichung = ',num2str(fehlergew)];
text7=['v = ',num2str(v),'m/s'];
text8=['W = ',num2str(minW)];
text9=['La = ',num2str(minLa),'m'];
text10=['Tk = ',num2str(Tk),'s'];
disp(text7)
disp(text8)
disp(text9)
disp(text10)
disp(text6)

```

*Published with MATLAB® R2014a*

